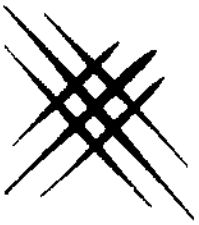
LES SÉLECTIONS DE

radio plans
AU SERVICE DE L'AMATEUR DE RADIO ET DE TÉLÉVISION

L. CHRÉTIEN
INGÉNIEUR E. S. E.

LES DIFFÉRENTES CLASSES D'AMPLIFICATION



43, rue de Dunkerque
PARIS-X^e^

LES DIFFÉRENTES CLASSES D'AMPLIFICATION

Il est fréquent de lire dans les revues de radio, que l'étage de sortie de tel ou tel récepteur à transistor est monté en CLASSE B ou que celui de tel amplicateur à très haute fidélité est monté en CLASSE A, B.

Ces expressions : CLASSE A, CLASSE B, CLASSE A2, CLASSE AB, ou AB2 paraissent sans doute assez claires à des amateurs chevronnés. Mais en est-il de même pour les nouveaux venus à l'électronique ?

Nous en doutons beaucoup. C'est donc à leur intention que nous écrivons le présent chapitre.

Introduction.

La désignation des différentes classes d'amplification est aujourd'hui adoptée d'une manière internationale. Elle s'applique aussi bien aux amplificateurs à tubes électroniques qu'aux amplificateurs utilisant les propriétés des semi-conducteurs : transistors, diodes-tunnels, etc. Tout technicien doit donc savoir exactement ce que signifie le fonctionnement d'un amplificateur en *classe A*, *en classe B* ou *en classe C*. Il y a aussi les fonctionnements intermédiaires : classe A' ou A2 ; classe AB, cette dernière se subdivisant en classe AB1 (ou AB') et en classe AB2 (ou AB'').

Pour traiter cette question d'une manière logique il nous semble que le plus simple est d'abord de donner les définitions principales. Après quoi, nous étudierons séparément chacune des classes de fonctionnement en nous efforçant d'en faire ressortir les avantages aussi bien que les inconvénients...

La méthode d'étude la plus simple, celle qui permet de faire une analyse de fonctionnement très claire est basée sur la considération des caractéristiques de fonctionnement.

Dans la plupart des cas, nous supposerons qu'il s'agit de tubes électroniques, mais les résultats que nous trouverons seront, en général, valables pour les transistors.

Définition des trois classes principales A, B, C.

Classe A (fig. 1).

Considérons la caractéristique de fonctionnement qui donne le courant d'anode en fonction de la tension de grille (*fig.* 1). Cette caractéristique dans sa *région négative* peut être considérée comme droite entre les points K et L.

C'est précisément cet intervalle KL qui est utilisé dans l'amplification en classe A.

Dans ces conditions, le point de repos, ou point de fonctionnement moyen A est placé au milieu de cette partie droite.

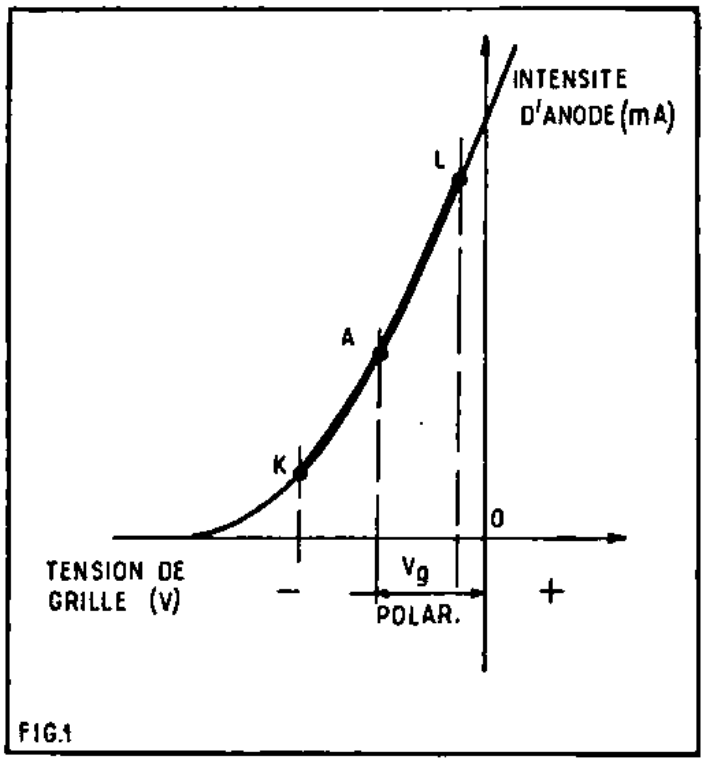


FIG. 1. — *Dans le fonctionnement en* classe A, *le point de repos A est choisi au milieu de la partie droite de la caractéristique. La grille ne doit être positive à aucun moment. On utilise donc exclusivement la portion de caractéristique KAL.*

Classe B (fig. 2).

Dans le fonctionnement en classe B (*fig.* 2) la tension de polarisation V*g* est réglée de manière que le courant anodique soit nul en l'absence de signal.

On ne tient pas compte de la rectitude de la caractéristique et, d'autre part, la tension instantanée de grille peut être négative ou positive. Le point de repos est ainsi, naturellement situé au début (ou, comme on dit : au pied) de la caractéristique. On dit encore qu'il s'agit du *point de coupure;* c'est-à-dire, en anglais, du *cut-off* (ce qui veut dire exactement la même chose).

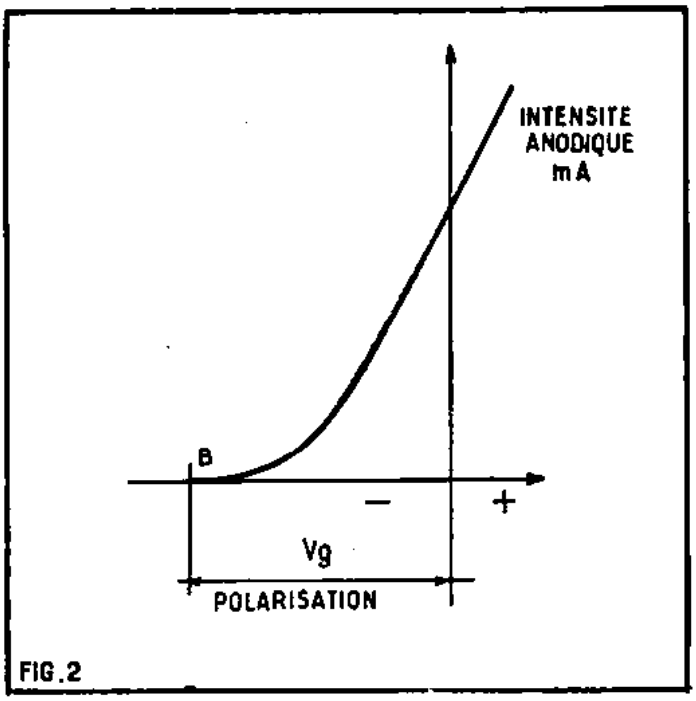


FIG. 2. — *Dans le fonctionnement en* classe B, *le point de repos B est choisi tout à fait au début de la caractéristique, de manière que le courant anodique soit nul quand il n'y a pas de signal à amplifier.*

Classe C (fig. 3).

En classe C, la tension de polarisation est encore plus grande qu'en classe B. Cela veut dire qu'elle est réglée au-delà du point de coupure.

De plus, comme en classe B, la tension instantanée de grille peut être positive ou négative.

Etude du fonctionnement en classe A.

Ce mode de fonctionnement, encore appelé *amplification linéaire,* est de beaucoup le plus utilisé. On a pratiquement toujours

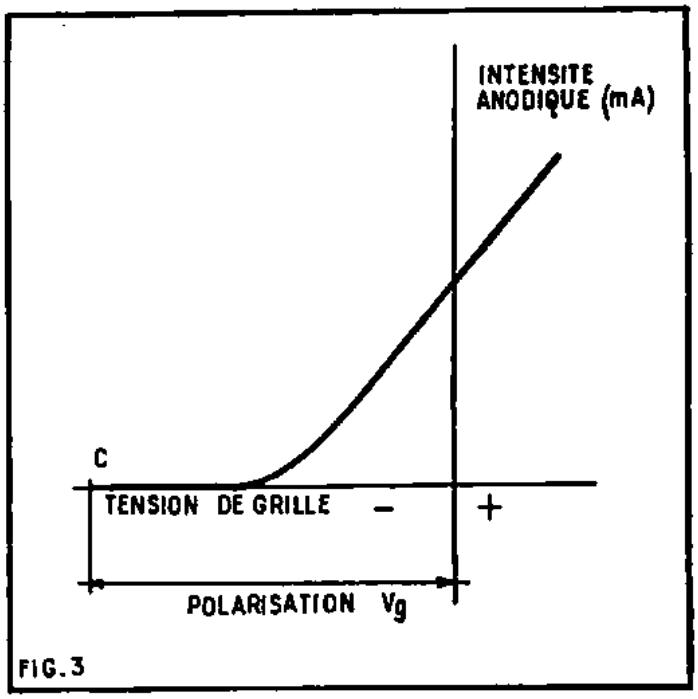


FIG. 3. — *Dans le fonctionnement en* classe C *le point de repos C est choisi au-delà du point de coupure (cut-off) de la caractéristique. Aucun courant anodique ne circule en l'absence de signal.*

recours à lui quand il s'agit d'amplifier un signal de faible amplitude aussi bien en haute fréquence, en moyenne fréquence qu'en basse fréquence.

Les classes B et C sont presque exclusivement utilisées pour obtenir une *amplification de puissance.* Pour qu'une comparaison puisse être utilement établie, nous devons donc considérer surtout l'amplification de *puissance* en classe A. Toutefois, toutes les observations qui seront faites pourront s'appliquer à tous les cas.

Pour qu'il y ait amplification en classe A, il faut que la région de caractéristique utilisée soit droite (comme KAL, *fig.* 1) et qu'il n'y ait pas de courant de grille.

Il ne faut pas que le point de fonctionnement instantané se déplace au-delà du point K. D'autre part, pour qu'il n'y ait point de courant de grille il faut, qu'à aucun moment, la grille ne devienne positive.

Bien mieux, le courant de grille commence à prendre naissance un peu avant que la grille ne devienne positive. Pour respecter parfaitement la condition posée, il faut qu'au moment où se produit la crête de la tension à amplifier, la polarisation soit encore d'au moins 0,5 V. Remarquons qu'en pratique on admet assez souvent que la tension instantanée de grille peut devenir nulle.

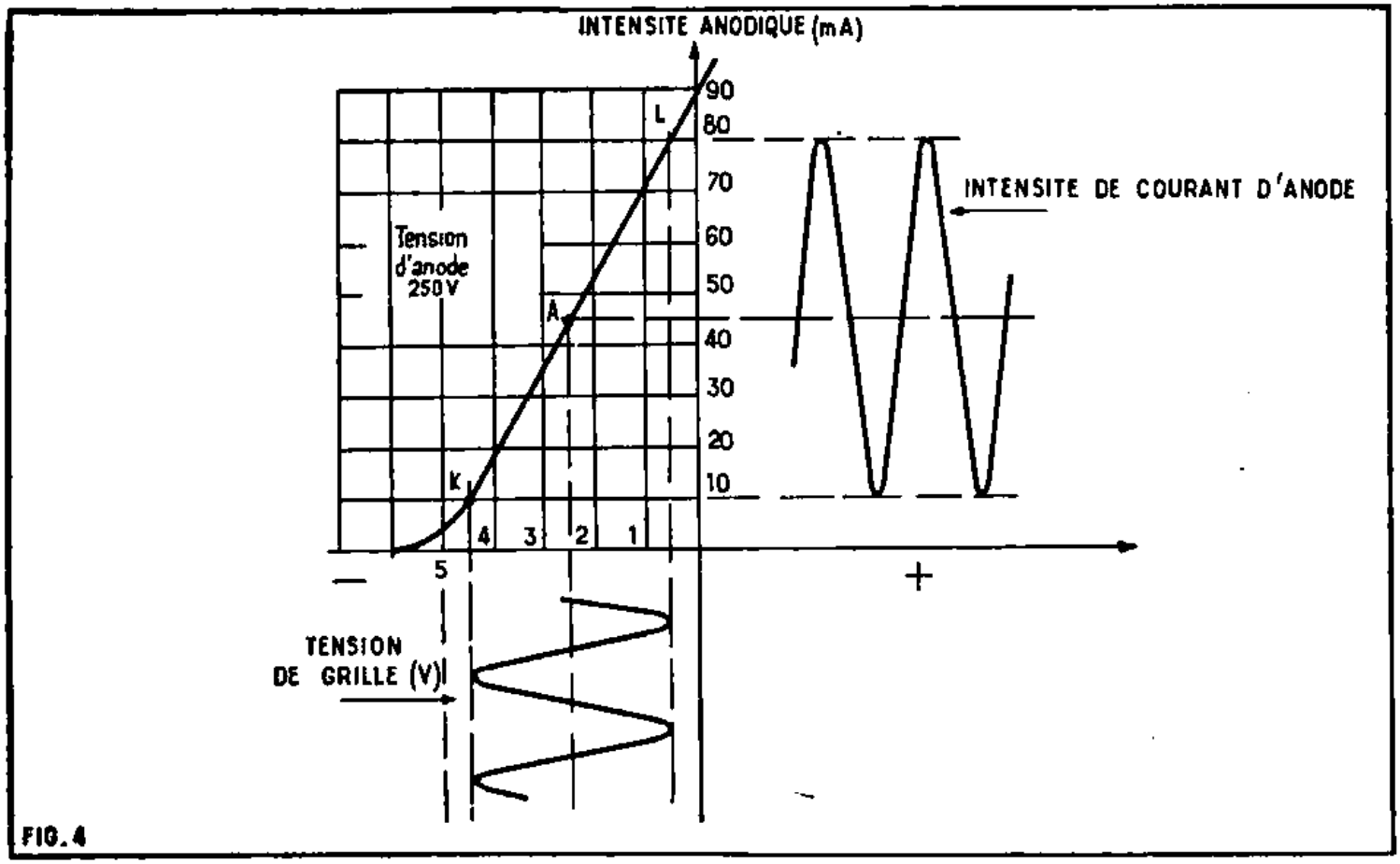


FIG. 4. — *Mécanisme de fonctionnement d'un amplificateur en classe A. On doit éviter, d'une part, la région coudée au-delà du point K, et d'autre part, la région située au-delà de L où se produirait un courant de grille.*

La détermination d'un exemple pratique sera sans doute beaucoup plus instructive. Considérons la caractéristique du tube électronique que l'on veut utiliser sur la figure 4. La polarisation instantanée de grille ne devant jamais être inférieure à 0,5 V, le point limite d'utilisation est L. D'autre part, cette caractéristique est droite jusqu'au point K correspondant à — 4,5 V. Il en résulte que le point de fonctionnement moyen est A situé à mi-chemin entre K et L et dont la polarisation est :

$$\frac{4,5 + 0,5}{2} = 2,5 \text{ V.}$$

On peut immédiatement voir que l'intensité anodique moyenne est de 45 mA.

Réalisons le montage représenté sur la figure 5. Et supposons, pour le moment, que la source de signal G ne fournisse aucune tension. La source de tension anodique V*p* dont la valeur est de 250 V fournit une intensité de 45 mA.

La puissance électrique fournie par V*p* est de $250 \times 0,045 = 11,25$ W.

Nous sommes en droit de nous demander ce que devient cette puissance puisque la résistance R n'est traversée par aucune intensité de courant.

En effet, les différents circuits ne comportent que des intensités continues et aucune force électromotrice ne peut apparaître dans le secondaire S du transformateur.

Dans ces conditions, il faut nécessairement que la puissance électrique empruntée à V*p* apparaisse sur l'anode du tube, sous forme de chaleur ou, comme on dit sous forme de puissance dissipée. Il faut naturellement choisir un tube qui puisse dissiper cette puissance sans que l'échauffement prenne des valeurs excessives.

Action d'un signal.

Que se passe-t-il si nous mettons en action le générateur G ?

Une première remarque importante qui caractérise précisément le fonctionnement en classe A, *c'est que l'indication fournie par l'appareil de mesure à cadre* Y *ne changera pas.* Cet appareil mesure, en effet, la *valeur moyenne de l'intensité.* Or, en classe A, celle-ci demeure invariable. C'est une conséquence du fait que la portion de carac-

téristique qu'on utilise est une droite. L'augmentation d'intensité instantanée due aux alternances positives est exactement compensée par la diminution symétrique apportée par les alternances négatives, si bien que la valeur moyenne ne change pas.

Nous avons d'ailleurs là, un moyen aussi simple qu'excellent de vérifier qu'un étage amplificateur fonctionne effectivement en classe A. Il suffit de vérifier, à l'aide d'un simple milliampèremètre à cadre que la valeur de l'intensité moyenne est invariable, quelle que soit l'amplitude du signal d'entrée, dans les limites normales. Et ces dernières sont fixées d'une part par le point K où s'amorce la courbure inférieure de la caractéristique et le point L correspondant à la naissance du courant de grille.

Puissance dissipée par le tube amplificateur.

Nous avons reconnu plus haut qu'au repos, c'est-à-dire en l'absence de signal d'entrée, la totalité de la puissance apparaissait, sous forme de chaleur, sur l'anode du tube amplificateur.

Quand il existe un signal d'entrée, c'est-à-dire (*fig.* 5) quand le générateur G fournit une tension nous constatons qu'il existe une composante alternative dans le courant d'anode (*fig.* 4). L'enroulement secondaire du transformateur T (*fig.* 5) est donc le

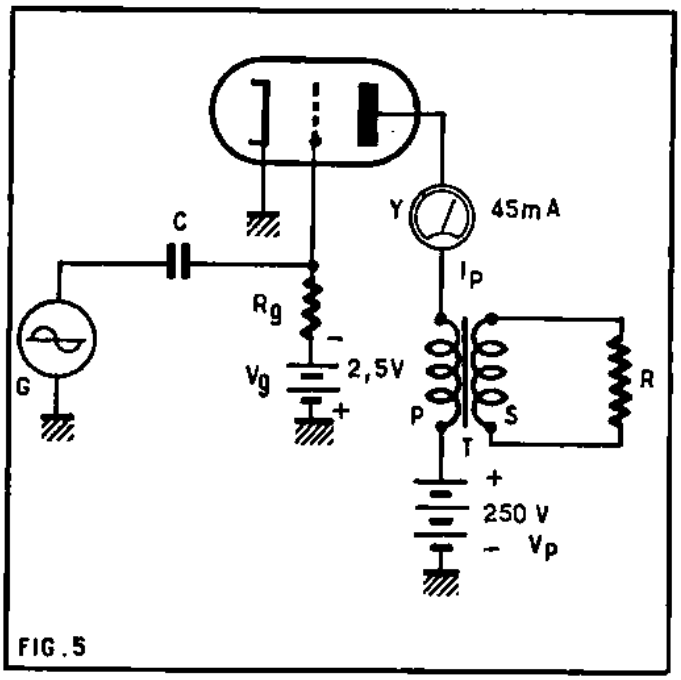


FIG. 5. — *En classe A, le milliampèremètre Y doit demeurer invariable quel que soit le niveau du signal. Il résulte de cela que la puissance électrique dissipée par le tube amplificateur est d'autant plus élevée que le signal est plus faible.*

siège d'une force électromotrice et la résistance R est parcourue par une certaine intensité de courant... En d'autres termes, le tube amplificateur fournit à l'extérieur une certaine puissance électrique. La résistance R pourrait être remplacée — par exemple — par la bobine mobile d'un haut-parleur.

D'où vient cette puissance puisque l'intensité moyenne fournie par Vp est demeurée invariable ? La réponse s'impose : *cette puissance vient nécessairement en déduction de celle qui était dissipée par l'anode.*

Nous en arrivons ainsi à une conclusion extrêmement importante et, sans doute, quelque peu inattendue pour certains de nos lecteurs :

En classe A, le tube amplificateur chauffe d'autant moins qu'on exige de lui plus de puissance acoustique.

C'est au repos que le tube s'échauffe le plus et qu'en conséquence, il se fatigue davantage.

L'impédance de charge optimale.

Notre propos n'est pas de reprendre ici la théorie complète de l'amplification de puissance en classe A. Nos lecteurs, s'ils le désirent, pourront se reporter aux ouvrages spéciaux (1). Nous nous bornerons, par conséquent, à rappeler les résultats essentiels.

Pour tirer du tube le maximum de puissance, il faut que l'impédance de charge placée dans le circuit d'anode ait une valeur déterminée qu'on nomme l'*impédance de charge optimale.*

Beaucoup d'usagers s'imaginent que cette valeur est parfaitement déterminée pour un modèle donné de tube amplificateur, alors qu'il n'en est rien. Tout dépend de la manière dont le problème est posé. Il faut d'abord distinguer s'il s'agit d'un tube triode ou d'un tube à grande résistance interne : tétrode à faisceaux dirigés et à distance critique ou pentode.

Cas d'un tube triode.

La théorie prévoit un certain nombre de cas qui conduisent tous à des valeurs différentes. C'est ainsi, par exemple, que la tension d'anode peut être fixée ou ne pas l'être, que la tension de grille d'attaque est donnée ou non, etc.

(1) *Théorie et Pratique des Tubes Électroniques*, par L. Chrétien. Editions E. Chiron.

De plus, la valeur théorique de l'impédance optimale ne correspond pas toujours à la meilleure utilisation du tube amplificateur. Elle correspond par exemple à une distorsion exagérée pour une puissance relativement faible. On est ainsi amené à choisir une valeur différente de la valeur calculée.

Prenons un exemple précis. Dans le mode d'utilisation classique, c'est-à-dire avec une tension d'attaque qui n'est pas fixée, et que l'on peut choisir à volonté, avec une tension anodique déterminée (250 ou 300 V pour les tubes usuels) la valeur théorique de l'impédance de charge optimale est égale au double de la résistance intérieure. Ainsi, tel tube triode de puissance qui présente une résistance interne de 800 Ω, devrait être *théoriquement* utilisé avec une impédance de charge de 1 600 Ω.

Mais le constructeur recommande d'utiliser 2 300 Ω... Parce que, dans ces conditions, on peut tirer du tube une puissance plus grande pour un même taux de distorsion.

Cas d'un tube pentode ou tétrode.

Quand il s'agit d'un tube à grande résistance intérieure, comme c'est le cas des tubes tétrodes et pentodes, le calcul théotique de l'impédance de charge optimale est établi en admettant que la résistance intérieure est infiniment grande par rapport à l'impédance de charge. On admet généralement, de plus, que la tension instantanée d'anode peut baisser jusqu'à son point d'annulation.

Dans ces conditions (évidemment abusives) l'impédance de charge est donnée tout simplement par le rapport entre la tension d'anode et l'intensité moyenne du courant d'anode. C'est donc tout à fait simple...

Si un tube amplificateur consomme 36 mA sous 250 V, son impédance de charge doit être simplement de :

$$250 / 0{,}036 = 7\,000\ \Omega \text{ environ.}$$

Sans vouloir discuter cette question, signalons qu'il ne faut pas considérer le chiffre ainsi calculé comme *parole d'évangile* (si l'on peut dire). Dans beaucoup de circonstances, il y a intérêt à le modifier dans un sens ou dans l'autre...

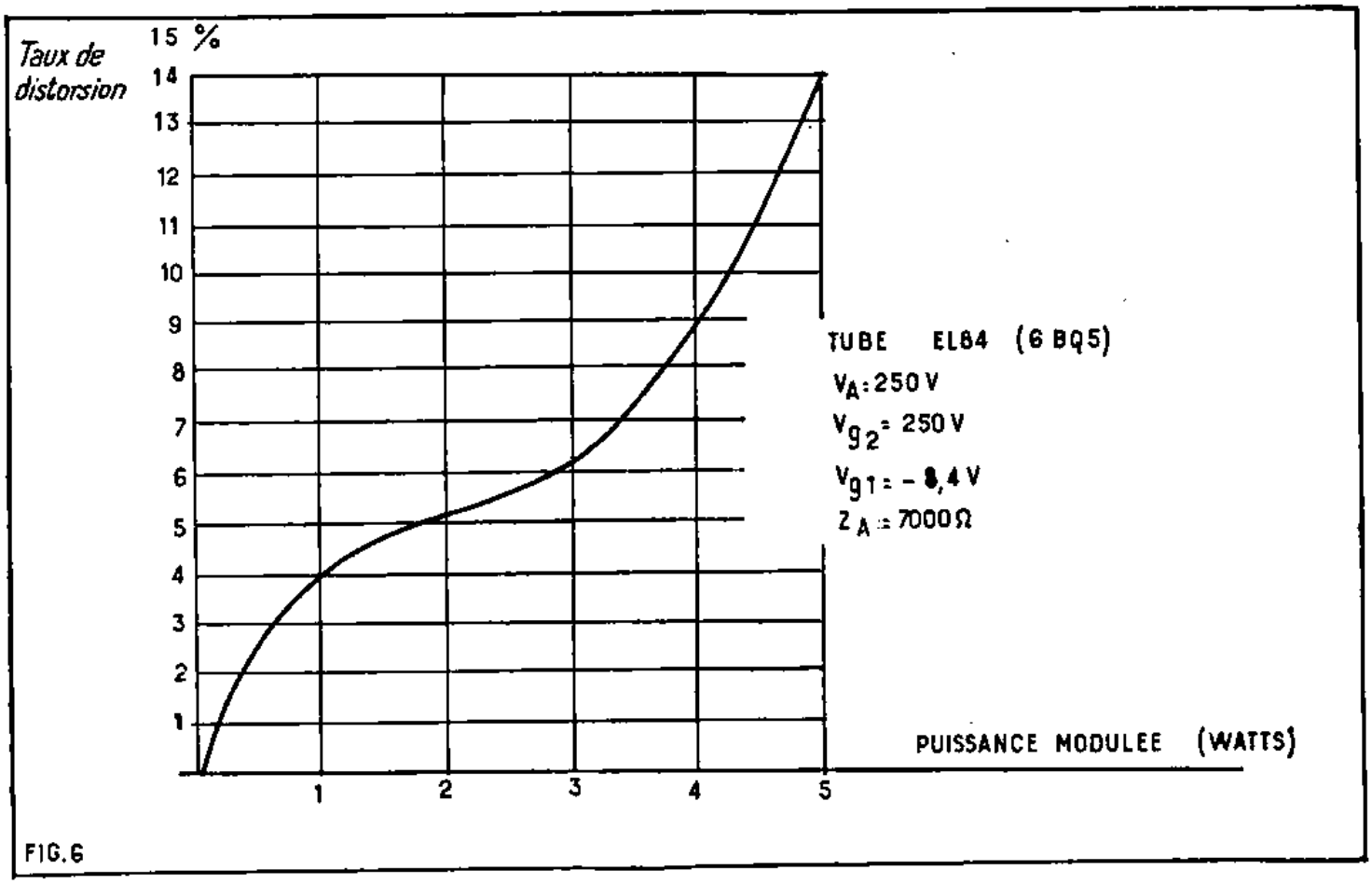


FIG. 6. — *Courbe de distorsion d'une pentode de puissance EL84 en fonction de la puissance produite. La forme de cette courbe est déterminée par l'allure générale de la caractéristique dynamique.*

Le rendement.

Un tube de puissance doit, comme son nom l'indique, fournir une certaine puissance électrique aux circuits extérieurs. Il est doublement intéressant que la puissance qu'il emprunte à la source d'alimentation soit aussi faible que possible.

En premier lieu parce que les questions d'alimentation sont ainsi d'autant simplifiées.

En second lieu parce que la puissance prise à l'alimentation qui n'est pas transformée en puissance utile apparaît dans le tube amplificateur sous forme de chaleur. Or, l'échauffement d'un tube n'est jamais souhaitable. Et c'est encore moins souhaitable quand il s'agit d'un transistor.

Il est donc nécessaire d'obtenir un *rendement* aussi grand que possible : le rendement étant précisément le rapport entre la puissance fournie par l'alimentation et la puissance utile délivrée par l'étage amplificateur.

Or le calcul et l'expérience sont d'accord pour nous apprendre qu'en classe A le *rendement* est toujours assez faible. Avec un tube triode il atteint au maximum 25 %. Le chiffre est un peu plus favorable pour un tube tétrode ou pentode puisqu'il atteint 50 %. Toutefois, ce chiffre théorique est établi sans tenir compte de la consommation de la grille écran. Il s'agit simplement de ce qu'on pourrait nommer le *rendement anodique*. Si l'on tient compte de la consommation d'écran, le rendement maximal est d'environ 30 à 35 %.

Il faut d'ailleurs bien comprendre que le rendement ne peut pas être fixé d'une manière absolue, car il dépend du taux de distorsion que l'on admet. Et, sur ce point particulier, il y aurait beaucoup de choses à dire. Prenons, par exemple, le cas d'une pentode moderne EL84 (ou 6BQ5) utilisée en classe A, avec une impédance de charge de 7 000 Ω.

Le courant d'anode au repos est de 36 mA pour une tension anodique de 250 V, avec une polarisation de — 8,4 V. Le courant de grille écran est de 4,1 mA sous 250 V. Si nous traçons une courbe donnant le taux de distorsion en fonction de la puissance produite nous obtenons le résultat indiqué figure 6.

La consommation totale du tube est de :

$0{,}036 \times 250 = 9$ W pour l'anode.
$4{,}1 \times 250 = 1{,}25$ W pour la grille écran.

Si l'on admet une distorsion de 10 % (ce qui est considérable et incompatible avec une *haute fidélité* — la puissance produite est de 4,25 W et, dans ces conditions, le rendement atteint 4,25 /10,25 soit 41 % environ.

Mais si nous estimons que le maximum de distorsion tolérable est de 5 %, la puissance maximale produite est de 1,8 W et le rendement n'est plus que :

1,8 /10,25 soit 17 % environ.

Pour bien montrer que l'on peut prendre certaines libertés avec la notion d'impédance de charge optimale, signalons que ce même tube peut être utilisé dans les conditions suivantes :

VA	250 V
V*g*2	250 V
V*g*1	7,3 V

L'intensité d'anode est alors de 48 mA, et celle de la grille écran de 5,5 mA.

Avec une charge de 4 500 Ω (et non plus de 7 000 !) on obtient une puissance de 5,7 W avec une distorsion de 10 %.

Détermination d'un étage d'amplification en classe A.

C'est d'après les caractéristiques du tube que l'on peut utilement déterminer les éléments du fonctionnement.

Prenons cette fois encore, l'exemple du tube EL84 qui est un des plus utilisés à l'heure actuelle.

Le réseau de caractéristiques reproduit sur la figure 7 est un réseau de courbes *statiques*, c'est-à-dire tracées sans qu'on introduise une charge dans le circuit d'anode; il nous permet de définir, par exemple, la caractéristique donnant le courant d'anode en fonction de la tension de grille que nous avons reproduite figure 8.

Mais il est évident que cette courbe ne correspond pas aux conditions réelles de fonctionnement, car — encore une fois — quand le tube fonctionne normalement, il y a, dans le circuit d'anode, une impédance de charge dont la valeur — pour les courants alternatifs, est de 7 000 Ω.

La figure 8 est, en effet, tracée en admettant que la tension existant entre cathode et anode est toujours de 250 V. Or, il n'en sera pas ainsi s'il y a une impédance dans le circuit d'anode (*fig.* 9). Supposons pour l'instant qu'il s'agisse d'une résistance pure de 4 500 Ω.

Admettons que l'intensité soit de 10 mA.

La chute de tension dans la résistance sera de $0{,}01 \times 4\,500 = 45$ V.

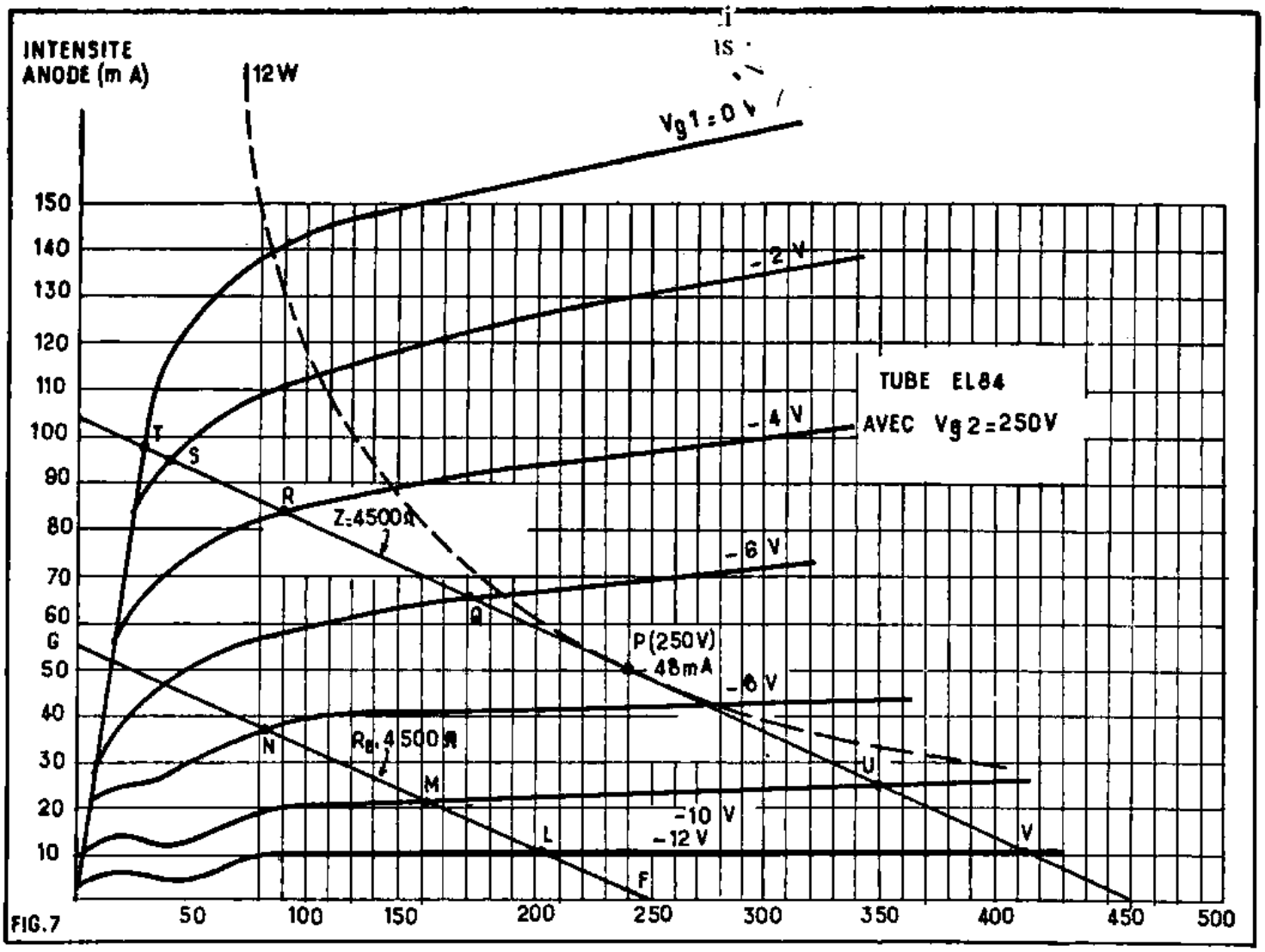


Fig. 7. — *Réseau de caractéristique d'un tube EL84 ou 6BQ5 avec une tension de grille écran de 250 V. On a tracé la courbe qui détermine la zone de dissipation maximale admissible (12 W). On a également représenté une droite de charge relative à une* résistance *pure de 4 500 Ω (F6) et une droite de charge relative à une impédance de même valeur, avec une tension anodique de 250 V et une polarisation de — 7,3 V.*

En conséquence, la tension effective ne sera plus que 250 — 45 = 205 V, et les indications que nous pourrions retirer de l'examen de la courbe figure 8 sont inexactes puisque celle-ci a été établie en supposant qu'il existe une tension anodique de 250 V.

Quand le tube fonctionne, il y a des variations d'intensité. Si celle-ci passe, par exemple, à 20 mA, la chute de tension est de 90 V et la tension effective n'est plus que de 160 V. Pour que la tension entre cathode et anode soit de 250 V, il faut que l'intensité dans le tube soit nulle.

N'est-il pas possible de déterminer exactement les conditions de fonctionnement ?

Si. Il suffit pour cela de combiner la différence de potentiel fournie par la source et les chutes de tension dans la résistance. Ces dernières peuvent être déterminées graphiquement, d'une manière que nous avons étudiée dans un article précédent, à propos des diodes-tunnels.

On tracera le diagramme de la résistance ou *droite de charge.* Le point F (*fig.* 7) est précisément un point de cette droite puisqu'il correspond à une intensité nulle et à une tension de 250 V. D'autre part, s'il y a une chute de tension de 250 V dans la résistance, la tension appliquée sera nulle. Cela se produira pour I = E/R ou 250/4 500 = 55,5 mA.

En conséquence le point G fait partie de cette droite et nous pourrons ainsi la tracer en joignant F et G.

En prenant toutes les intersections de cette droite avec les courbes de la figure 7,

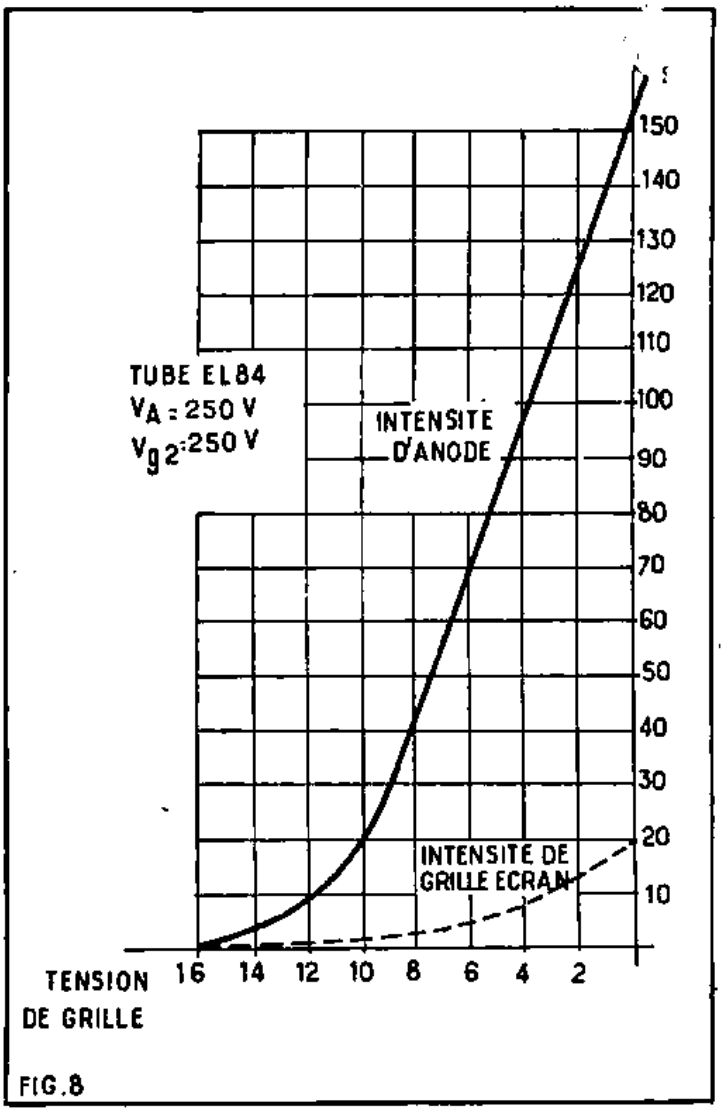


FIG. 8. — *Caractéristique statique du tube EL84, c'est-à-dire sans impédance de charge.*

comme LMN, etc., nous pouvons tracer la courbe dynamique...

Mais cela ne correspond pas aux conditions d'utilisation de notre étage de puissance.

En effet, l'impédance Z qui est généralement l'enroulement primaire du transformateur de sortie ne se comporte pas comme une résistance pure. Sa résistance est même pratiquement négligeable pour le courant continu. Ce n'est que pour le courant alternatif qu'elle oppose de la résistance.

La vraie droite de charge.

Nous pouvons facilement tenir compte de cela. Reprenons l'exemple déjà donné. Le tube polarisé par une tension de 7,3 V fournit une intensité de 48 mA. Le point figuratif est P sur notre diagramme.

On notera qu'il est en bordure de la courbe pointillée correspondant à une puissance dissipée de 12 W, puissance limite autorisée par le constructeur. Tout le long de cette courbe le produit de l'intensité par la tension donne 12 W. Un mathématicien vous dirait que cette courbe est une branche d'hyperbole équilatère. Le point de repos doit donc être en dehors de cette courbe. Comme nous voulons tirer le maximum de notre tube, nous l'avons placé exactement sur la courbe.

Ce point P est déjà un point de la droite de charge. Comme l'impédance est de 4 500 Ω l'inclinaison du diagramme est exactement la même que pour une résistance pure de même valeur. Nous obtenons ainsi la droite qui s'étend de V à T... en passant, naturellement, par le point P.

Tracé de la courbe dynamique.

Certains lecteurs s'étonneront peut-être en constatant que la droite s'étend de P à V... jusqu'à une tension égale à 450 V, alors que la tension anodique n'est que de 250 V. C'est pourtant parfaitement normal. L'impédance Z est, par définition même, un élément *réactif*. Cela veut dire que, suivant la position de phase, la tension qui se produit entre ses extrémités peut se retrancher de la tension anodique ou, au contraire, *s'ajouter*... C'est précisément de

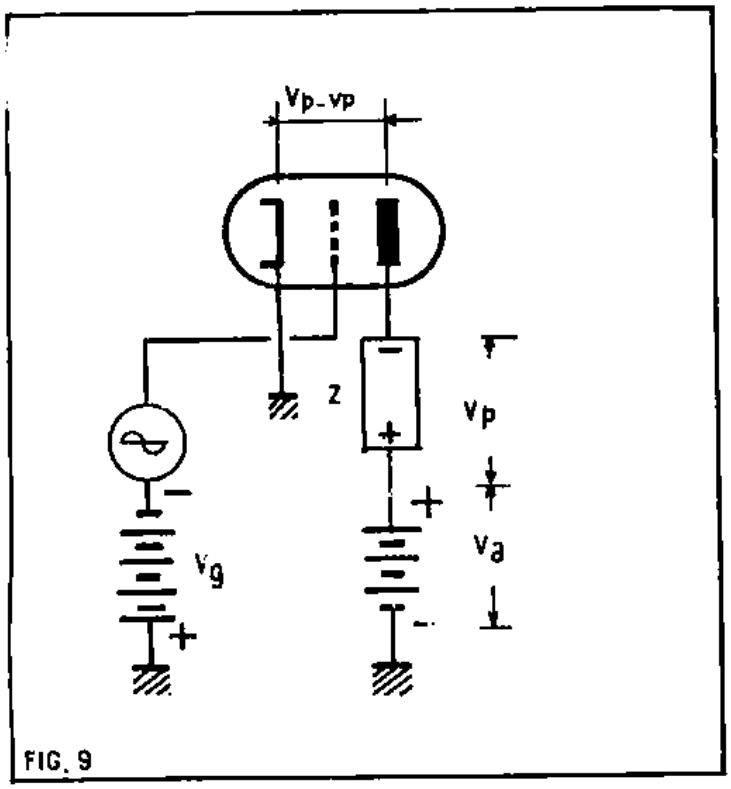


FIG. 9. — *La tension anodique effective n'est pas égale à la tension d'alimentation. Il faut en déduire la chute de tension dans l'impédance de charge Z. Si celle-ci est une résistance, il s'agit toujours d'une chute de tension. Si c'est une impédance,* Vp *peut s'ajouter à* Vp.

cette manière qu'on peut obtenir des tensions de crête voisines de 10 000 V dans le circuit d'anode d'un tube de balayage de téléviseur en partant d'une tension anodique de 180 ou 200 V.

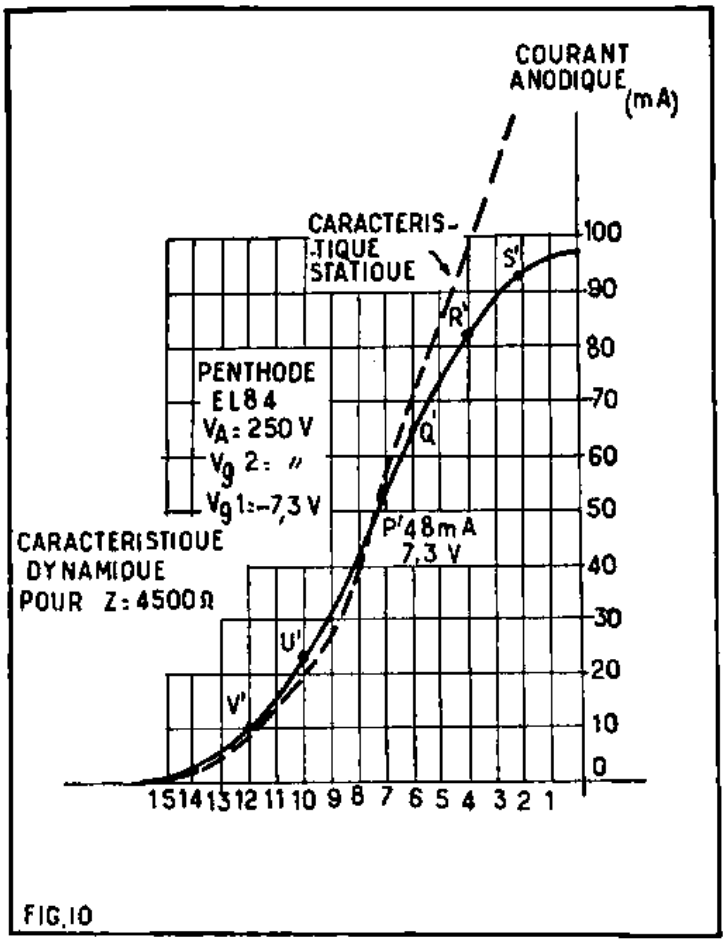

COURANT ANODIQUE (mA)
CARACTERIS-TIQUE STATIQUE
PENTHODE EL84
VA: 250 V
Vg 2: "
Vg 1: -7,3 V
CARACTERISTIQUE DYNAMIQUE POUR Z: 4500 Ω
P' 48 mA 7,3 V
S' R' Q' U' V'
100 90 80 70 60 50 40 30 20 10 0
15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1
FIG.10

Fig. 10. — *Le diagramme de la figure 7 permet le tracé de la caractéristique dynamique. On voit combien celle-ci peut être différente de la caractéristique statique.*
On reconnaît ici la forme caractéristique en S d'une caractéristique dynamique d'un tube pentode.

Revenons à notre diagramme. Le tracé de la caractéristique dynamique est maintenant très simple.

Prenons deux axes (*fig.* 10), l'un pour la tension de grille, l'autre pour l'intensité d'anode. Il est évident que le point P', correspondant à I = 48 mA et Vg = 7,3 appartient aux deux courbes.

Pour — 12 V (point V, *fig.* 7) l'intensité est de 12 mA, ce qui nous donne le point V'. Pour — 10 (point U) nous obtenons le point U', pour — 6 le point Q', etc., jusqu'au point T'. Il suffit de relier ces points entre eux pour obtenir la courbe cherchée. On voit ainsi qu'elle n'a pas du tout la même forme que la caractéristique statique. Pour faciliter la comparaison, nous avons tracé cette dernière en pointillé.

La caractéristique classique se présente avec une double courbure, le point d'inflexion central est précisément le point de repos. Nous voyons bien, de la sorte, que ce point a été correctement choisi. Et nous remarquerons aussi l'origine de la distorsion. Cette forme de lettre S majuscule est caractéristique pour les tubes pentodes de puissance. C'est à cause d'elle qu'il y a production de distorsion par des harmoniques de rangs impairs (qui sont particulièrement désagréables à l'oreille).

S'il s'était agi d'un tube triode de puissance, nous aurions obtenu une caractéristique dynamique de forme parabolique comme celle que nous avons reproduit figure 10. La distorsion aurait été moins désagréable. En revanche, le rendement aurait été plus faible.

Les caractéristiques dynamiques permettent de déterminer la puissance modulée qu'on peut obtenir pour une tension d'attaque de grille donnée.

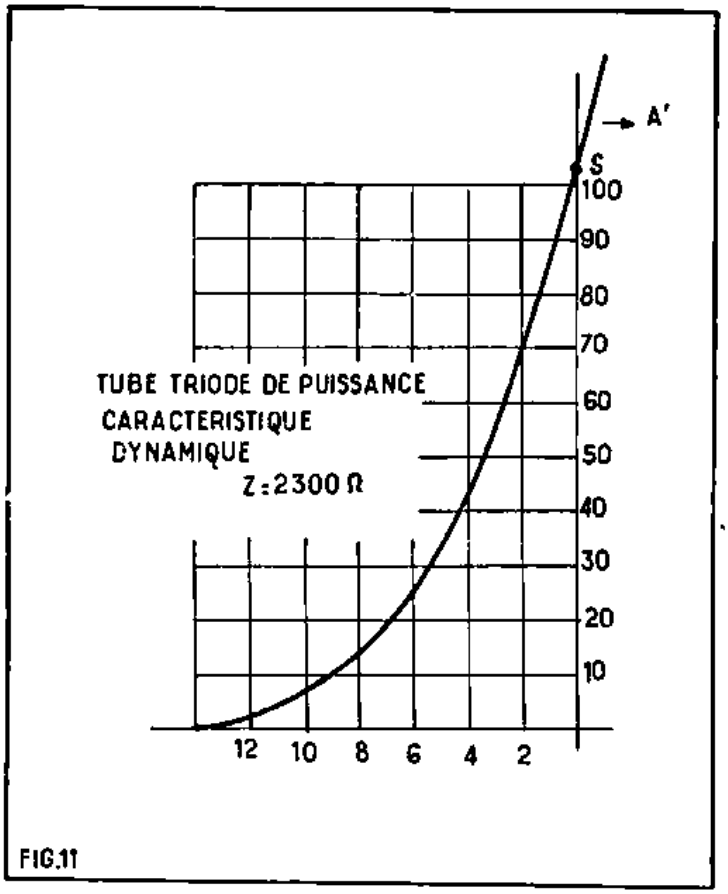


Fig. 11. — *La caractéristique dynamique d'un tube triode ne présente pas de point d'inflexion, en d'autres termes, la courbure est toujours dans le même sens. On comparera avec la caractéristique d'un tube pentode* (fig. 10).

Résumé et conclusion.

Le fonctionnement en classe A peut être caractérisé de la manière suivante :

1° Le point de repos est choisi au milieu de la caractéristique dynamique ; de telle sorte que l'intensité anodique moyenne demeure invariable au cours du fonctionnement.

2° La distorsion est d'autant plus faible que la puissance utile produite est elle-même plus faible. Elle croît régulièrement à mesure qu'on exige une puissance plus grande.

3° Le rendement n'est jamais supérieur à 50 %. Pour atteindre une valeur de cet ordre, il faut tolérer une grande distorsion : de l'ordre de 10 % par exemple.

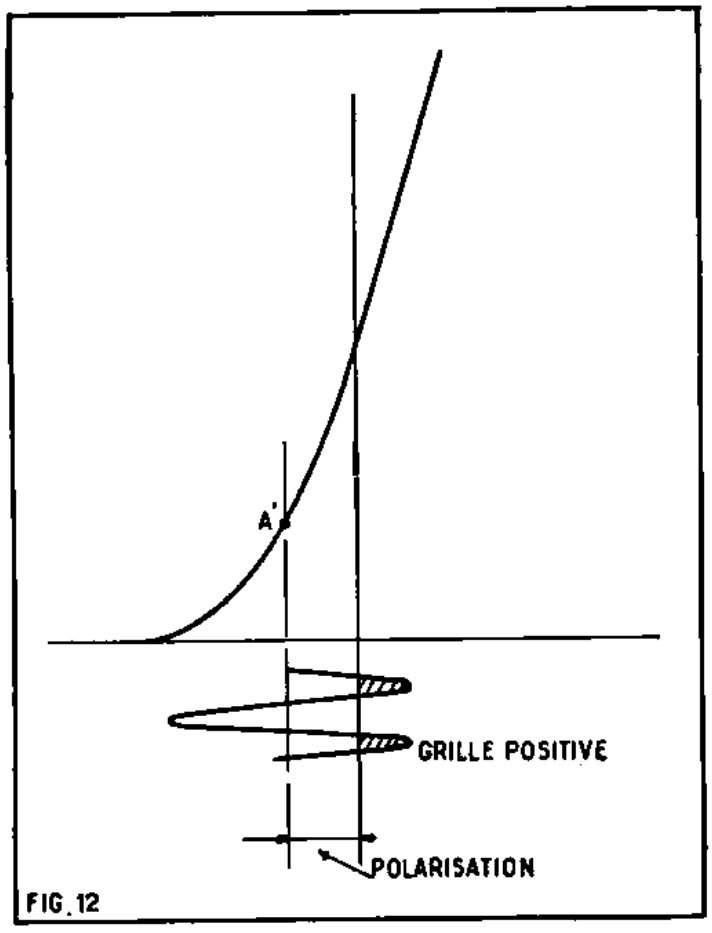


FIG. 12. — *Fonctionnement en classe A' ou A2. La définition est analogue à celle de fonctionnement en classe A, toutefois la grille devient positive par instants.*

La classe A' ou A2.

C'est un mode de fonctionnement très rarement utilisé, mais qui peut cependant ne pas manquer d'intérêt dans certains cas.

Dans le cas d'un tube pentode (*fig.* 9), la caractéristique présente une courbure supérieure importante. Il faut donc limiter la tension d'attaque de manière que la tension de grille instantanée demeure toujours négative.

La courbure supérieure est la conséquence du « genou » des caractéristiques (*voir fig.* 7) qui se manifeste quand la tension instantanée d'anode devient très inférieure à la tension de grille écran. Cet effet a pour cause l'augmentation du courant instantané de grille écran. Il est inévitable quand il s'agit de tubes à grande résistance interne.

Mais il n'a aucune raison de se produire quand il s'agit d'un tube triode puisqu'il n'y a pas de grille écran.

Et il en est bien ainsi comme le montre la caractéristique dynamique d'un tube triode de puissance (*fig.* 10). La courbe continue de monter bien au-delà du point S correspondant à une tension grille nulle.

On peut donc parfaitement envisager d'utiliser le tube avec des tensions instantanées de grilles positives. Et tel est, précisément, le principe du fonctionnement en classe A' ou A2.

On conserve la même impédance de charge, mais la tension d'attaque est suffisante pour rendre la grille positive par moments.

Il en résulte une augmentation de rendement qui peut atteindre 50 % pour un tube triode (au lieu de 25 %).

Il y a également production d'un courant de grille de commande. Pour que les conséquences ne soient pas désastreuses, il faut que le circuit ne comporte qu'une résistance ohmique négligeable. Il en résulte que le couplage par résistance capacité doit être prohibé et qu'il faut adopter, par exemple, un couplage par transformateur ou, encore, remplacer la résistance de grille par une bobine d'arrêt.

L'AMPLIFICATION CLASSE B

Dans le précédent chapitre, nous avons défini les trois régimes de fonctionnement applicables aussi bien aux amplificateurs de puissance à tubes électroniques qu'aux amplificateurs à transistors : CLASSE A, CLASSE B et CLASSE C, sans compter les classes intermédiaires dont il sera question par la suite.

Nous avons ensuite étudié le régime A qui est le plus répandu quand il s'agit de fournir une petite puissance avec un tube électronique. La plupart des récepteurs de radiodiffusion utilisant des tubes électroniques et des téléviseurs sont munis d'un étage final qui fonctionne en classe A.

Dans ce régime l'intensité de courant empruntée à l'alimentation demeure invariable quelle que soit la puissance produite.

C'est exactement comme si la consommation horaire d'un moteur de voiture était le même, que le moteur fonctionne au ralenti ou à pleine charge, en hissant la voiture le long d'une pente raide...

Il résulte de cette situation que le rendement énergétique est très faible quand l'amplificateur ne fournit qu'une faible puissance. A pleine charge, il n'atteint pas de très grandes valeurs puisqu'en pratique il ne dépasse pas trente pour cent. Cela veut dire que soixante-dix pour cent de la puissance fournie par l'alimentation est convertie en chaleur dans le tube amplificateur. Cette situation deviendrait intolérable s'il s'agissait d'un amplificateur de grande puissance. Dans ces conditions on peut faire appel au régime de fonctionnement en CLASSE B que nous allons précisément étudier ci-dessous.

Avantages de la classe B.

Tant que la puissance du tube électronique alimentant le haut-parleur demeure très faible, la question du rendement peut être considérée comme secondaire. La chose essentielle est que le tube puisse dissiper l'excès de puissance fournie par l'alimentation sans que sa durée de vie soit compromise. Tant qu'il s'agit d'une puissance modulée inférieure à 10 W on peut admettre que l'énergie empruntée au secteur est parfaitement négligeable.

Mais il n'en sera plus du tout de même quand il s'agira de puissances de plusieurs dizaines de watts. Tout d'abord, il faut utiliser des tubes spéciaux, du type professionnel, qui sont beaucoup plus coûteux. De plus, si le rendement est faible, il faut prévoir une alimentation beaucoup plus puissante : transformateur plus gros, donc plus coûteux, encombrement exagéré des éléments, difficulté de filtrage, prévision de ventilation pour éviter l'augmentation de température, etc.

S'il s'agit d'un amplificateur à transistors, c'est encore beaucoup plus important. Les modèles les plus courants ne peuvent dissiper qu'une puissance très faible, s'exprimant non plus en watts, mais en *milliwatts*. Les modèles de puissance, pouvant dissiper des watts sont beaucoup plus coûteux, ce qui interdit totalement leur emploi pour certains types de réalisation. La seule solution c'est l'emploi de transistors de semi-puissance. Mais pour pouvoir en tirer une énergie acoustique suffisante, il faut atteindre des rendements beaucoup plus

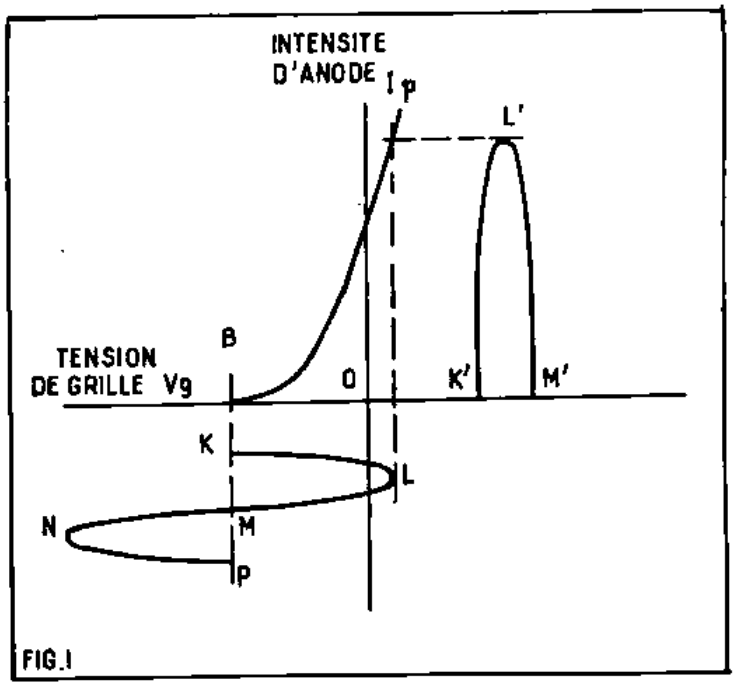


FIG. 1. — *Le principe de l'amplification en classe B. Le tube est polarisé de manière à couper le courant d'anode (B, point de coupure ou de « cut-off »). De plus la tension d'attaque est d'assez grande amplitude pour conduire le point de fonctionnement dans les régions positives correspondant au passage d'un courant de grille.*

élevés que ceux de la classe A. On est ainsi conduit à adopter le régime de fonctionnement B.

Une autre raison conduit à la même solution. Ces appareils à transistors sont généralement alimentés au moyen de piles dites « sèches » (en réalité : à liquide immobilisé). Ces piles ne peuvent économiquement fournir qu'une intensité de courant de quelques dizaines de milliampères. A partir de la faible puissance qui correspond à cette valeur de l'intensité, il faut obtenir le maximum de puissance utile. Il faut donc — en conséquence — que le rendement soit aussi bon que possible. Or, en classe B, le rendement théorique est supérieur à 70 %. Et, ce qui est fort important, ce rendement peut demeurer fort acceptable, même à très faible niveau.

Principe des montages en classe B.

Dans les montages en classe B (*fig.* 1) le point de repos est choisi, au pied de la caractéristique courant anodique/tension de grille — c'est-à-dire au *point de coupure* (en anglais : *cut-off*).

De plus, l'utilisation de la caractéristique n'est pas limitée aux régions correspondant à une valeur négative de la tension de grille.

L'amplitude d'attaque peut donc dépasser la valeur de la tension de polarisation et conduire la tension instantanée de grille dans les régions de grille positives, c'est-à-dire dans les régions où se produit le *courant de grille*.

Il résulte, évidemment, de cela que l'intensité anodique est nulle au repos. Elle croît dans le même sens que la tension d'attaque, c'est-à-dire que la puissance produite. C'est cette situation logique qui permet de comprendre pourquoi le rendement est bien supérieur à celui qu'on peut obtenir en classe A, surtout quand l'étage ne fournit qu'une faible fraction de la puissance de pleine charge.

Or, il est bien évident qu'un étage de puissance destiné à fournir une reproduction musicale ne fonctionnera à pleine charge que pendant relativement très peu de temps. Les œuvres musicales ne comportent que de rares moments de *fortissimo*. Le plus souvent, la puissance moyenne de l'amplificateur ne représente qu'une très faible fraction de la puissance de crête qu'il est capable de donner...

Dans notre dernier article nous avons reconnu que, dans un amplificateur en classe A, le rendement est déplorablement faible quand la puissance produite est elle-même peu importante. Cela s'explique sans peine puisque la puissance empruntée à la source d'alimentation

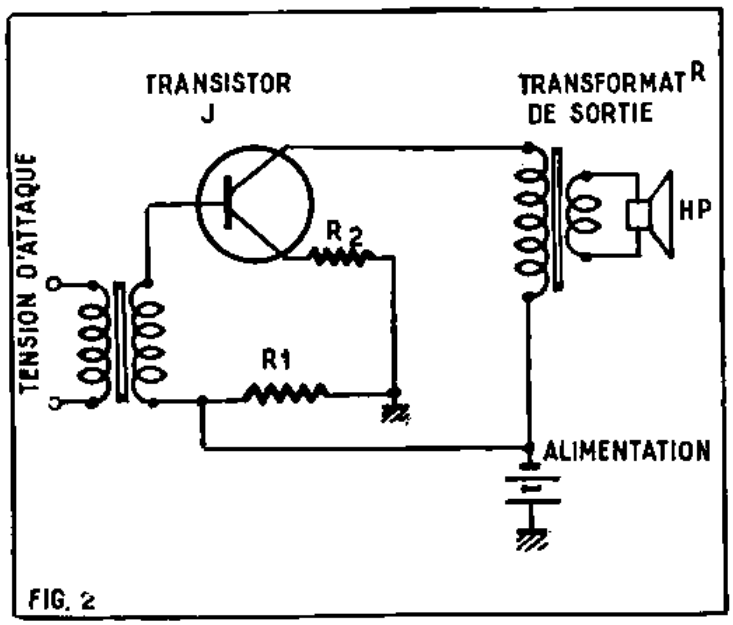


FIG. 2. — *Montage d'un transistor en classe B. Les différentes constantes sont réglées pour que le courant de base soit sensiblement annulé.*

demeure constante, dans toutes les circonstances, même au repos.

Le fonctionnement en classe B peut aussi bien convenir pour les tubes triodes que pour les tubes tétrodes et pentodes, utilisant une grille écran. Dans les meilleures conditions, le rendement théorique atteint 78,5 %. C'est donc tout à fait considérable.

Classe B avec les transistors.

Tout ce qui précède et tout ce qui suit peut se transposer dans le monde des transistors. Considérons, par exemple, un transistor de puissance J utilisant la configuration : émetteur à la masse ou émetteur commun qui est le schéma le plus généralement utilisé (*fig.* 2). Nous pouvons régler les différents paramètres pour que le courant de base soit sensiblement nul en l'absence d'un signal à amplifier.

Tout signal entraînera une augmentation de l'intensité de base et — comme conséquence — une augmentation de l'intensité de collecteur, la tension instantanée de collecteur variant en sens inverse. Ce sera encore un fonctionnement en classe B.

D'une manière plus précise nous pouvons représenter le réseau des caractéristiques du courant de collecteur en fonction de la tension de collecteur comme sur la figure 3. Le point de fonctionnement B sera choisi sur la caractéristique correspondant à un courant de base nul (I b 0).

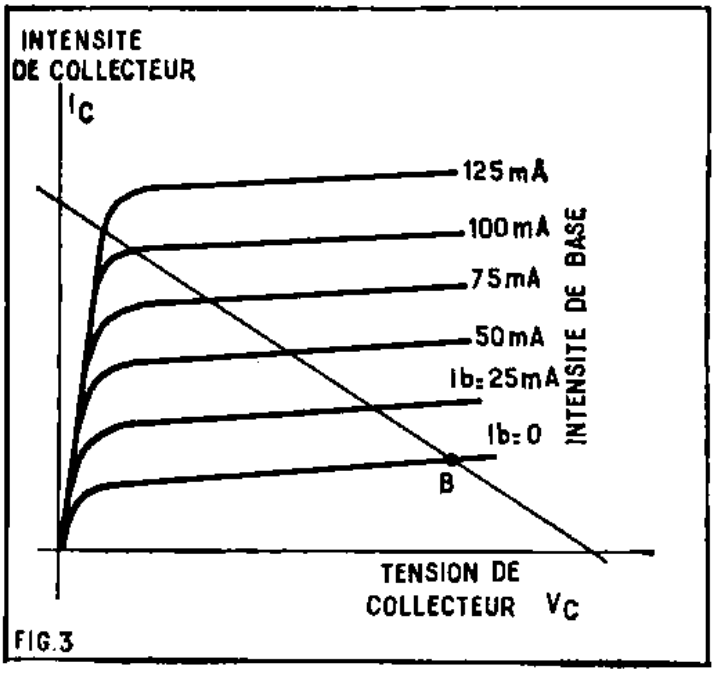


Fig. 3. — *Diagramme de fonctionnement d'un transistor en classe B. Le point de repos est B. La droite de charge est BD.*

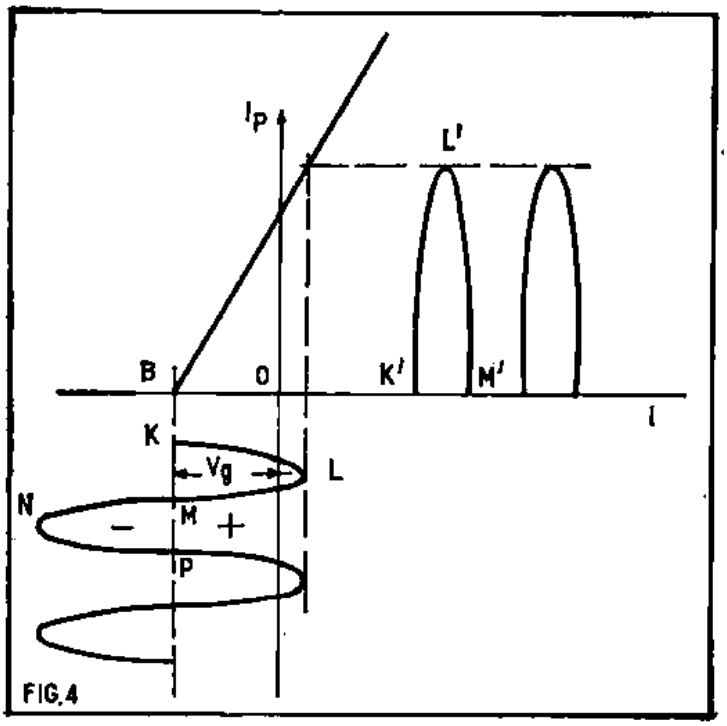


Fig. 4. — *Même dans le cas d'une caractéristique idéalement linéaire, le fonctionnement d'un seul tube en classe B produit une distorsion inadmissible puisqu'une seule alternance est transmise.*

L'application d'une tension d'attaque déplacera vers le haut le point B le long de la droite de charge BD.

Exactement comme dans le cas d'un tube électronique, le courant de repos sera pratiquement nul en l'absence de signal d'entrée et sa valeur croîtra à mesure qu'on exigera une puissance plus grande de l'étage.

Ce mode de fonctionnement apparaît ici particulièrement intéressant parce que l'énergie est fournie généralement par des piles sèches dont la durée de vie dépend essentiellement de l'intensité qu'on leur emprunte.

Revers de la médaille (considérons la fig. 4).

Appliquons à la grille du tube une tension sinusoïdale KLMNP. Si nous admettons que la caractéristique est linéaire, comme c'est le cas de la figure, l'alternance KLM fournira une variation d'intensité strictement sinusoïdale et sera, par conséquent, exactement reproduite. C'est tout à fait normal puisque le point B correspond à la coupure du courant anodique. Toute *diminution* de polarisation négative instantanée se traduit par une certaine intensité de courant d'anode.

En revanche, l'alternance négative MNP apportera une *augmentation* de polarisation négative et ne pourra, par consé-

quent, amener une apparition de courant anodique. *Ainsi, cette alternance sera complètement éliminée.*

Ce système ne peut donc absolument pas convenir pour la reproduction de tensions téléphoniques. La distorsion serait absolument catastrophique.

Si nous nous reportons à la figure 3, représentant le diagramme de fonctionnement d'un transistor de puissance en classe B, nous voyons immédiatement que la situation est tout à fait analogue, cette fois encore, il y a élimination d'une alternance.

Solution : emploi d'un montage symétrique.

La solution c'est, dans un cas comme dans l'autre, l'emploi d'un montage symétrique utilisant deux éléments amplificateurs. Le premier élément fournira l'amplification d'une première alternance, l'autre élément fournira l'amplification de la seconde alternance. Les choses étant ainsi rétablies, on pourra profiter des avantages de l'amplification en classe B.

En pratique, il faut évidemment que les électrodes de commande des deux éléments amplificateurs reçoivent des tensions d'attaque exactement en opposition de phase. Notre amplificateur sera donc tout simplement un *montage symétrique* ou *push-pull.*

Nous avons représenté le montage complet de l'étage final dans le cas de tubes électroniques sur la figure 5, ce qui va

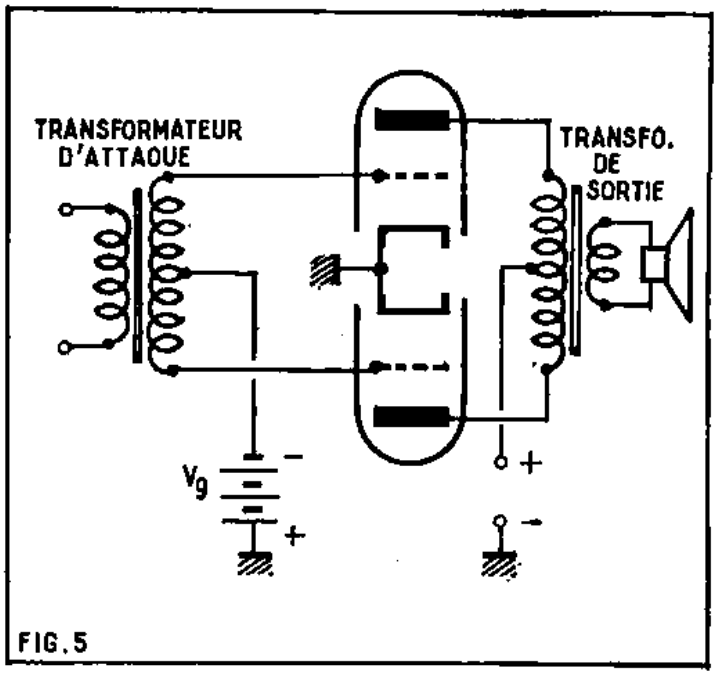


FIG. 5. — *Montage symétrique en classe B, Vg est réglé pour que le courant de repos soit nul.*

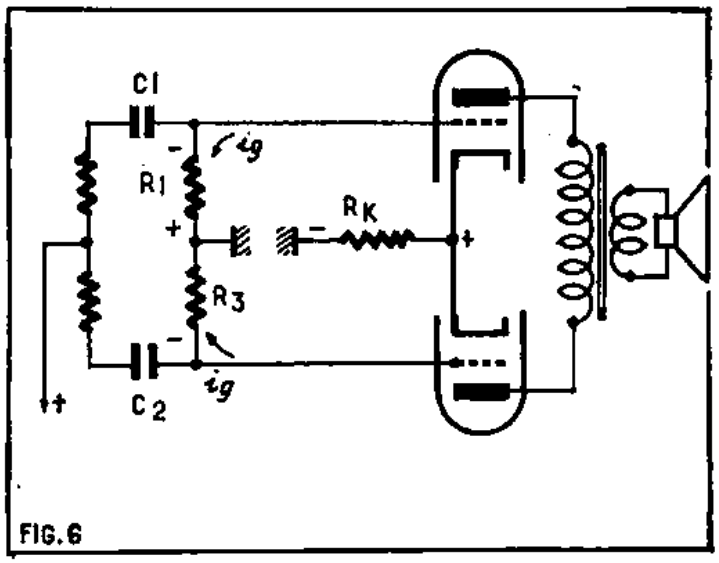


FIG. 6. — *En classe B, il est impossible d'utiliser des circuits de liaisons présentant des résistances de grille élevées. Le courant de grille ne se produisant que pendant une fraction d'alternance, il y aurait production d'une distorsion considérable.*

nous permettre de faire un certain nombre de remarques très importantes.

Polarisation des grilles.

Dans les montages symétriques que nous avons eu l'occasion de décrire à différentes reprises dans *Radio-Plans*, nous avons généralement prévu une *polarisation automatique des grilles.* Ce résultat peut être facilement obtenu au moyen d'une résistance R*k* insérée dans le retour commun des cathodes, comme sur la figure 6. Le passage du courant anodique dans la résistance R*k* provoque l'apparition d'une chute de tension dont le sens est indiqué par les signes + et —. La cathode devient ainsi positive par rapport à la grille... ce qui veut, évidemment, dire que la grille devient négative par rapport à la cathode.

Ce moyen est particulièrement commode dans le cas des montages symétriques en classe A, car il n'est même pas besoin de « découpler » cette résistance en plaçant un condensateur en parallèle. Les composantes alternatives, de même amplitude et déphasées de 180° s'annulent.

Dans le cas présent ce moyen ne peut être retenu pour deux raisons également déterminantes :

a) Le fonctionnement en classe B suppose que l'intensité du courant de repos est nulle. Si l'intensité est nulle... il n'y

a pas de chute de tension dans Rk. On arrive ainsi à une absurdité ;

b) La polarisation doit demeurer fixe et égale à Vg (*voir fig.* 4). Or, l'intensité de courant varie au cours du fonctionnement en fonction de la puissance fournie par l'étage final.

Il y aurait donc une variation constante de polarisation — ce qui est contraire au principe même du fonctionnement en classe B.

Il faudra donc, par un moyen quelconque, faire en sorte que la tension moyenne de grille demeure constante et égale à Vg. *Ce point est d'une extrême importance.*

Le courant de grille.

Il ne faut pas oublier qu'au cours du fonctionnement les tensions instantanées de grille peuvent prendre des valeurs positives, il y a donc nécessairement passage d'une certaine intensité de courant de grille.

Il résulte de cela que l'emploi de liaisons de grille comme celles qui sont représentées sur la figure 6 est impossible. En

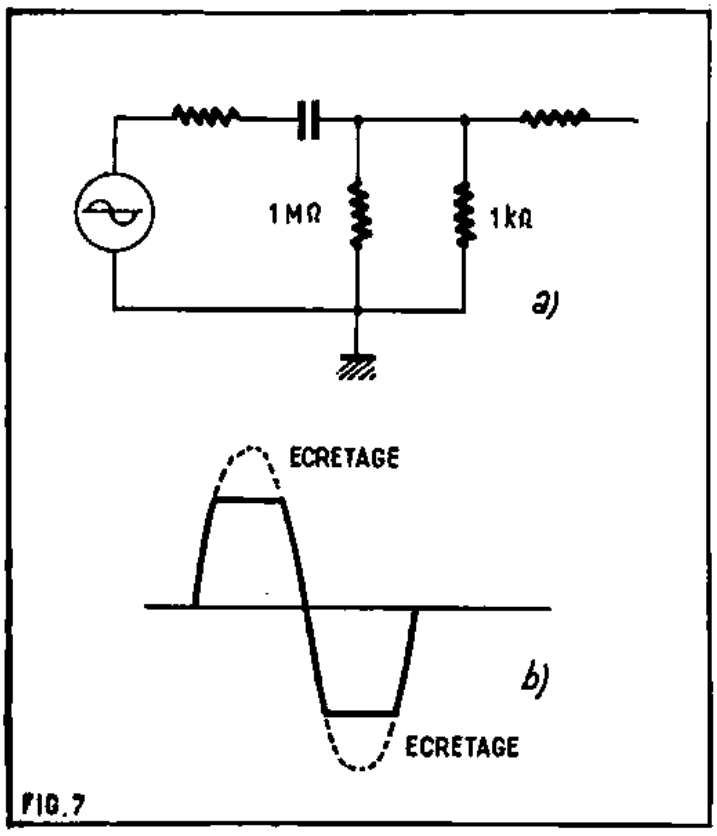


FIG. 7. — *Distorsion produite par le courant de grille dans un circuit présentant une résistance élevée. En* a) *le circuit équivalent, en* b) *le résultat produit.*

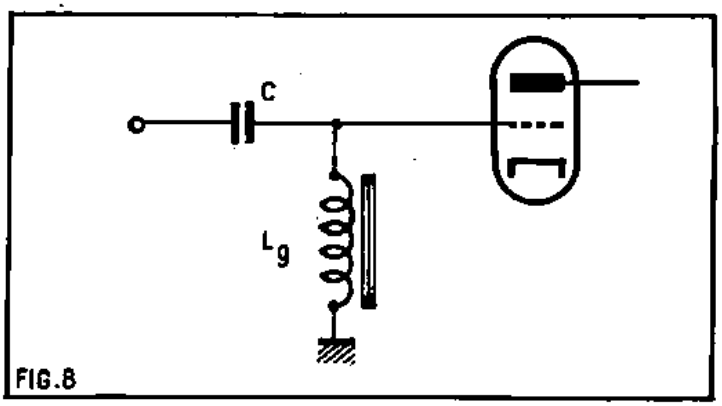


FIG. 8. — *Si l'on veut réaliser une liaison par condensateur, il faut remplacer la résistance de grille par une inductance dont la résistance en courant continu est négligeable.*

effet, les tensions de grille sont déterminées par l'intermédiaire de résistances élevées (de 100 000 à 1 000 000 d'ohms). La moindre intensité de courant dans le circuit entraînera une chute de tension dans le sens indiqué sur le croquis. Le déplacement du point de fonctionnement qui en résultera se traduira encore par une distorsion considérable.

De plus, il faut comprendre que la résistance équivalente à l'intervalle grille-cathode devient extrêmement faible (de l'ordre de 1 000 Ω, par exemple) dès que la grille devient positive. La situation est donc alors celle qui correspond à la figure 7 *a*). Tout se passe comme si la source de signal était mise en court-circuit pendant une fraction de l'alternance. Il y aurait un sévère « rabotage » ou « écrétage », c'est-à-dire une distorsion considérable.

Pour que cet effet ne se produise pas, il faut que le courant de grille puisse circuler sans provoquer de chute de tension. En d'autres termes, il faut que le circuit de liaison ne comporte aucune résistance élevée. Le couplage au moyen d'un transformateur remplit cette condition. Si l'on veut maintenir la liaison au moyen d'un condensateur, il faut remplacer la résistance par une inductance (*fig.* 8) dont la résistance ohmique doit être négligeable, mais dont la *réactance d'auto-induction* doit être très grande pour toutes les fréquences correspondant au fonctionnement de l'amplificateur.

L'excitation de grille.

Dans un amplificateur à tubes électroniques en classe A, la grille des tubes de

puissance n'étant positive à aucun moment il n'y a pas de courant de grille. Il en résulte que la source de signal ne fournit théoriquement aucune puissance électrique. C'est pour cette raison que le signal d'entrée peut être fourni par des tubes électroniques ordinaires, dits : amplificateurs de tension.

Dans un montage en classe B, nous venons d'indiquer qu'il y a production de courant de grille. Puisqu'il y a simultanément intensité et tension, il y a nécessairement une certaine *puissance électrique*. En conséquence, il faut que l'*étage d'attaque* (en anglais : *driver*) puisse fournir la puissance nécessaire sans qu'il en résulte une distorsion inacceptable.

La situation se présente à peu près de la même manière dans les amplificateurs à transistors. Surtout si l'étage final doit délivrer une puissance relativement grande, il est indispensable que l'étage d'attaque soit déterminé pour fournir la puissance nécessaire.

La tension d'anode.

S'il faut maintenir constante la tension de grille, il faut aussi maintenir invariable la tension d'anode pour éviter la production de distorsion. Ce problème ne présente aucune difficulté dans un amplificateur fonctionnant en classe A puisque la consommation de courant anodique demeure invariable au cours du fonctionnement. Mais il en est tout différemment avec un amplificateur utilisant la classe B.

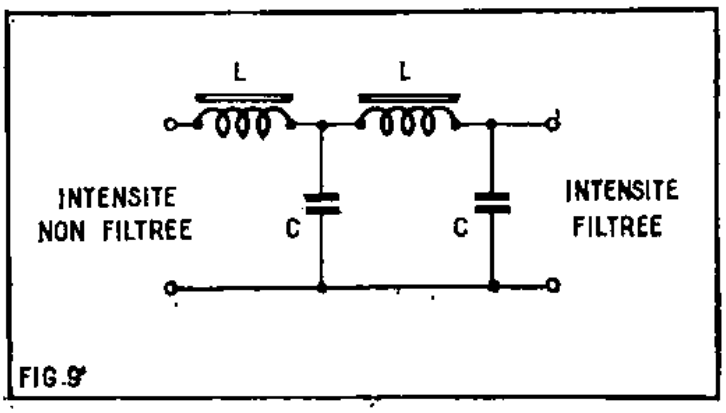


FIG. 9. — *Ce système de filtre, avec « inductance en tête » permet d'obtenir une meilleure régulation de la tension anodique.*

Les variations de consommation peuvent s'établir dans des proportions d'autant plus considérables que, dans un amplificateur, on peut généralement négliger la consommation des premiers étages par comparaison avec celle de l'étage de puissance.

Si l'amplificateur est équipé de tubes tétrodes ou pentodes, il est absolument indispensable de prendre des précautions toutes particulières pour alimenter ces électrodes.

Pour obtenir une « régulation » aussi bonne que possible de la tension d'anode, on fait généralement appel à des circuits de filtrage avec « *impédance en tête* » (*fig.* 9). Un tel circuit de filtre fournit une tension beaucoup moins importante que le montage le plus répandu, dans lequel l'entrée du filtre est un condensateur. Si le transformateur d'alimentation fournit, par exemple, deux fois 800 V, la tension qu'on peut obtenir à circuit ouvert est de $800 \times \sqrt{2}$ soit plus de 1 100 V continus. Avec le circuit de la figure 9, on aurait au maximum $\frac{2 \times 800 \sqrt{2}}{3.14}$ soit envir. 700 V.

Toutefois, la tension fournie par ce dernier circuit varie beaucoup moins en fonction de l'intensité consommée.

On améliore également la caractéristique de régulation en utilisant un redresseur à très faible résistance interne. L'emploi d'une valve à vapeur de mercure et à cathode chaude est intéressant.

Dans ces conditions, en effet, la chute de tension dans la valve de redresseur est pratiquement indépendante de l'intensité, elle est sensiblement de l'ordre de 15 V.

La distorsion à faible puissance.

On peut observer fréquemment que les amplificateurs fonctionnant en classe B

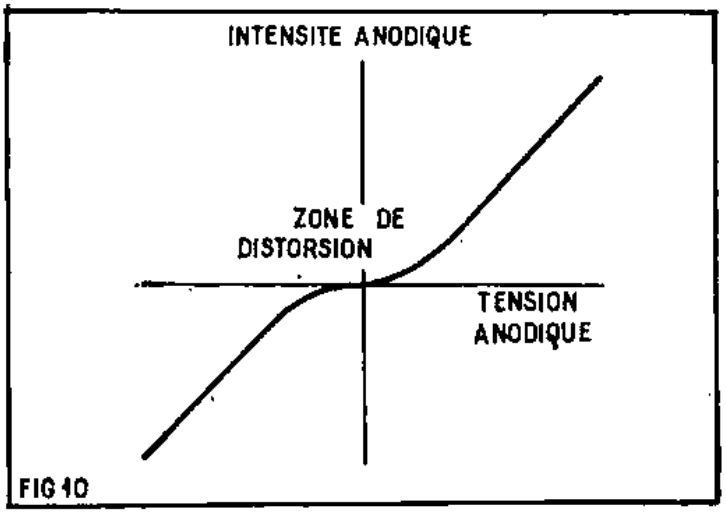


FIG. 10. — *Une telle forme de caractéristique composée provoque une importante distorsion* à bas niveau.

fournissent une audition de mauvaise qualité quand ils fonctionnent à faible puissance. Cette particularité vient généralement de la forme de la caractéristique composée. Celle-ci se présente assez souvent comme nous l'avons représentée sur la figure 10. Au lieu d'être parfaitement droite, elle présente un point d'inflexion au centre, c'est-à-dire précisément à l'endroit du raccordement des caractéristiques individuelles de chacun des deux tubes constituant le montage symétrique.

Nos lecteurs ont déjà compris que ce point d'inflexion était dû à la courbure inférieure de la caractéristique des tubes utilisés. On comparera à ce sujet la figure 1 qui représente une caractéristique réelle et la figure 4 qui est « idéalisée ».

Il est bien certain que, dans la région courbée, le gain est plus faible. Un effet tout à fait analogue se présente dans les montages symétriques équipés de transistors.

Le remède est le même, aussi bien pour les tubes amplificateurs que pour les transistors. Il ne faut pas que le point de repos soit dans la partie courbée, mais demeure dans une région sensiblement droite. Il faut donc diminuer légèrement la tension de polarisation. D'une manière plus précise, on procédera comme l'indique la figure 11. Le point de repos correspondant à la définition théorique du fonctionnement en classe B correspondrait à la tension de polarisation VB, c'est-à-dire exactement à l'annulation du courant d'anode.

Le point réellement choisi est B' qui correspond tout simplement à la tension VB obtenue en prolongeant la partie droite de la caractéristique jusqu'à la rencontre avec l'axe horizontal, au point K.

Dans ces conditions le courant de repos n'est pas exactement nul, mais correspond à I_0. Il en résulte, naturellement, une réduction du rendement énergétique. En revanche, ce qui est généralement beaucoup plus important, la distorsion à faible puissance est complètement éliminée.

Le même procédé s'applique aux amplificateurs symétriques à transistors fonctionnant en classe B.

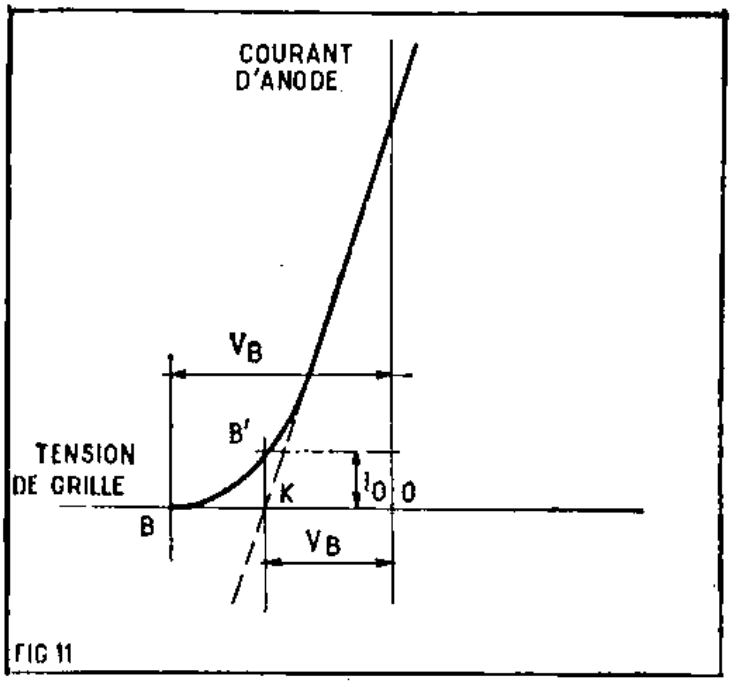


FIG. 11. — *Pour éviter l'apparition de la distorsion à bas niveau on ne polarise pas les tubes à la coupure. On détermine le point le plus favorable en prolongeant la partie droite de la caractéristique jusqu'au point K, rencontre avec l'axe horizontal. La valeur de polarisation est K-O.*

Tubes électroniques pour fonctionnement en classe B.

Il n'y a pratiquement aucun avantage à utiliser des tubes à très grand coefficient d'amplification comme les tubes pentodes ou tétrodes. Il faut, en effet, obtenir une stabilisation rigoureuse de la tension d'écran, ce qui est souvent un problème délicat à résoudre et la consommation d'écran compromet le rendement.

La sensibilité de ces tubes à quatre ou cinq électrodes n'est pas, ici, un avantage comme en classe A, car ce que le tube d'attaque doit fournir, ce n'est pas seulement une tension, mais c'est surtout une puissance.

Le rendement théorique de 78 % que permet l'amplification en classe B peut être plus facilement atteint avec des tubes triodes qu'avec des tubes pentodes, car il n'y a point de consommation de courant par des électrodes auxiliaires comme la grille écran, par exemple. La totalité de l'intensité empruntée à la source anodique peut être transformée en puissance téléphonique ou modulée. La nécessité de maintenir une polarisation rigoureusement fixe est impérative. On peut résoudre le problème de différentes manières. On peut naturellement avoir recours à une source de polarisation séparée. Mais il ne faut pas

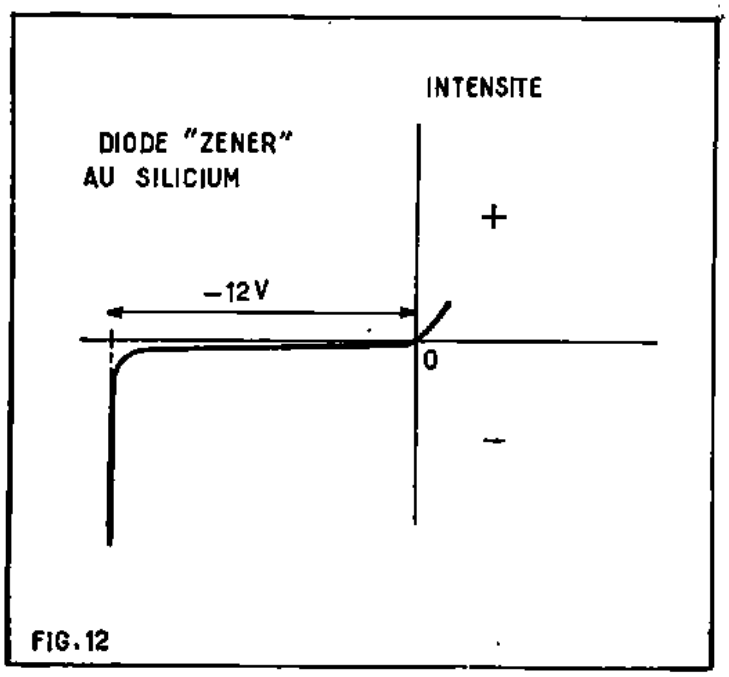


FIG. 12. — *On peut stabiliser la polarisation au moyen d'une diode de « Zener ».*

oublier que celle-ci, placée dans le circuit de grille, est amenée à fournir un certain débit de courant. On ne peut donc pas fixer la valeur de tension nécessaire au moyen d'un potentiomètre diviseur de tension classique, constitué par des résistances. On peut avoir recours à des cellules spéciales.

Un moyen efficace est l'emploi de diode, dit « Zener », qui sont de véritables références de tension (*fig.* 12). On peut associer plusieurs diodes Zener pour obtenir exactement la tension dont on a besoin.

On peut aussi utiliser des tubes triodes spéciaux qui ont été prévus pour fonctionner *avec une tension de polarisation nulle.*

Les électrodes ont été construites et placées de telle manière qu'avec la tension anodique normale et une tension de grille nulle, le courant anodique est presque nul.

D'une manière plus précise la caractéristique se présente comme nous l'indiquons sur la figure 13. Pour la tension d'anode normale, c'est-à-dire 300 V dans l'exemple choisi, le prolongement de la partie droite de la courbe caractéristique passe précisément par le point 0 V grille.

Le point de fonctionnement au repos B, correspondant à une polarisation nulle, est aussi celui qui correspond au minimum de distorsion à faible niveau. Cela permet de réaliser très simplement des amplificateurs en classe B.

Ces tubes spéciaux ont le défaut d'exiger une puissance relativement grande du tube d'attaque. Cela se comprend puisqu'il y a production de courant de grille dès le début de chaque alternance positive.

Doubles triodes spéciales.

Certains tubes, comme le modèle américain 6 N7 GT, comporte deux éléments triodes montés dans une ampoule commune pour le fonctionnement en classe B. Le principe adopté est celui que nous avons exposé dans le précédent paragraphe.

A titre documentaire, nous donnons ci-dessous les spécifications de ce tube.

Tubes à chauffage indirect alternatif ou continu :

Tension de chauffage.....	6,3 V
Intensité.....	0,8 A
Tension anodique maximale...	300 V
Intensité de crête par anode..	125 mA
Dissipation maximale moyenne par anode.....	5,5 W
Tension maximale entre filament et cathode.....	90 V

Fonctionnement en classe B.

Tension d'anode.....	300 V
Tension de polarisation.....	0
Tension de crête d'attaque (par grille).....	41 V

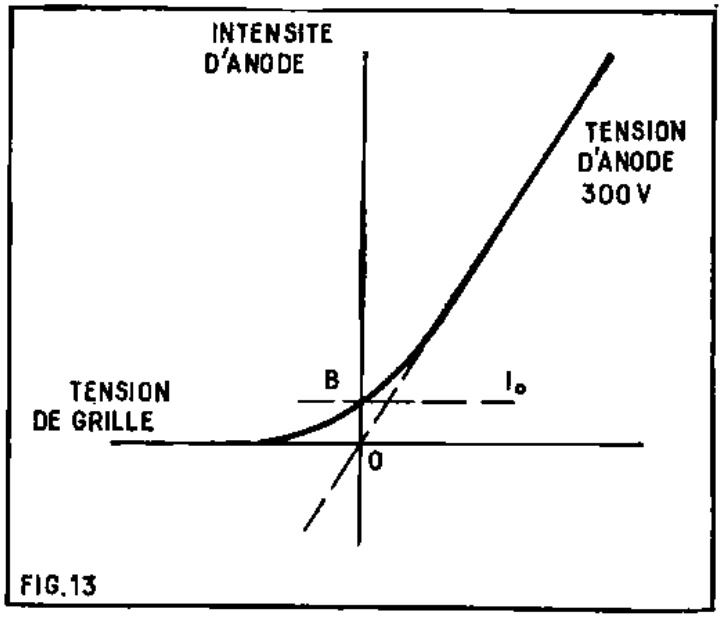


FIG. 13. — *Forme de caractéristique d'un tube permettant le fonctionnement en classe B sans polarisation.*

Intensité d'anode par plaque à signal nul	17,5 mA
maximal par anode	35 mA
Intensité de crête par grille à signal maximal	22 mA
Impédance de charge de plaque à plaque	8 000
Puissance de sortie	10 W
Distorsion harmonique totale	8 %

Utilisation de l'amplification en classe B.

L'amplification en classe B se prête difficilement à la reproduction acoustique à très haute fidélité — il y a toujours une certaine distorsion. On l'utilisera chaque fois qu'on cherchera à obtenir la plus grande puissance acoustique possible en dépensant la plus petite puissance possible d'alimentation. En d'autres termes, elle s'impose chaque fois que le facteur déterminant sera le rendement.

Il est curieux de constater qu'on est ainsi amené à utiliser des amplificateurs en classe B quand les éléments amplificateurs ne peuvent dissiper qu'une toute petite puissance et quand, au contraire, ils sont extrêmement puissants. Dans le premier cas, c'est pour obtenir le maximum de puissance utile, dans le second cas, c'est pour que la puissance empruntée à l'alimentation soit faible.

C'est ainsi, par exemple, que tous les récepteurs de radiodiffusion, les électrophones alimentés par piles ont presque toujours des étages de sortie prévus en classe B. Quand il s'agit d'appareils à transistors, c'est pour éviter d'employer des transistors de puissance et, en même temps, ménager la durée de vie des piles.

Le problème ne pourrait guère se résoudre autrement même si le prix des transistors de puissance permettait d'en envisager l'emploi dans les appareils portatifs. En effet, admettons que l'étage final puisse fournir effectivement 3 W modulés. On ne peut guère compter sur un rendement global dépassant 50 % (et encore, nous sommes très optimistes !). Dans ces conditions la puissance empruntée à la batterie atteindrait 6 W. Une batterie de 6 V devrait fournir 1 A.

Aucune pile sèche ne peut assurer le passage d'une telle intensité avec une durée de vie acceptable.

L'amplification en classe B est souvent utilisée à l'émission quand il s'agit d'amplifier les tensions de haute fréquence modulées en amplitude. Dans ce cas, l'emploi d'étages en classe C est impossible. C'est pourquoi on a recours à la classe B, en sacrifiant quelque peu le rendement.

L'AMPLIFICATION CLASSE C

Rappel des définitions.

Dans l'amplification en classe A (*fig.* 1) le point de repos A est choisi au milieu de la partie droite de la caractéristique. Celle-ci est délimitée, d'une part, par la courbure inférieure, d'autre part par la région où commence à se manifester le courant de grille. Celui-ci commence à circuler pour une tension négative de l'ordre de 0,5 à 1 V. On admet toutefois assez souvent qu'il n'existe que dans les régions correspondant à une tension de grille positive.

Dans les conditions que nous venons de définir, l'intensité de courant moyenne I*m* demeure absolument invariable au cours du fonctionnement, même quand la tension d'attaque est nulle.

Dans le fonctionnement en classe B la polarisation V*g* (*fig.* 2) est choisie de manière que l'intensité anodique soit tout juste annulée. Le point de repos est B. De plus, la tension d'attaque peut être assez importante pour que le point de fonctionnement pénètre dans les régions positives. Il y a donc nécessairement une intensité de courant de grille pendant une fraction de la période.

L'intensité moyenne croît ainsi dans le même sens que la puissance utile. Toutefois, une seule alternance est reproduite par le tube amplificateur. Il faut utiliser un mon-

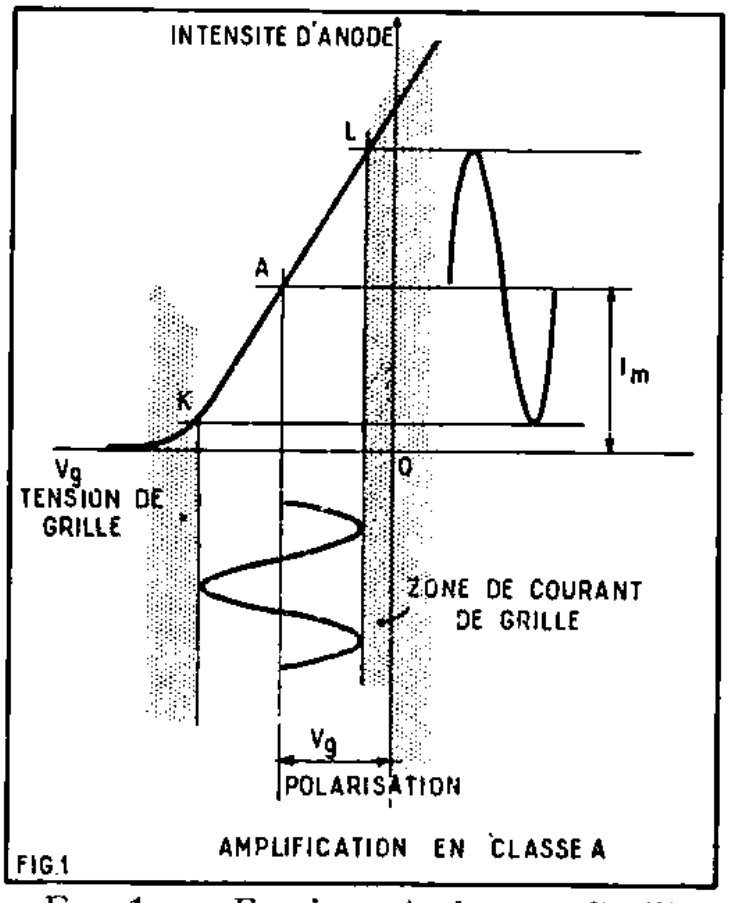
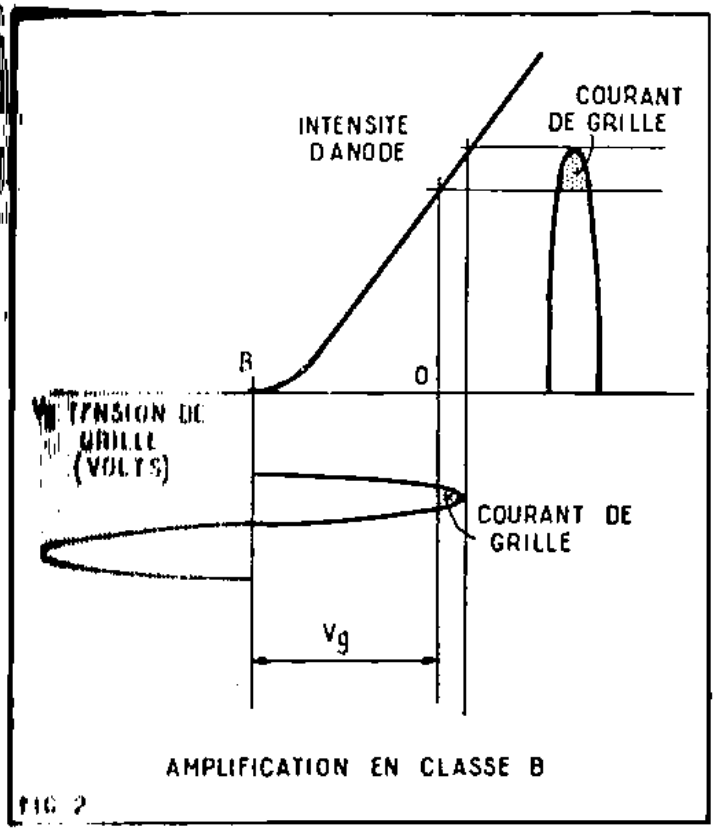


FIG. 1. — *En classe* A, *la zone d'utilisation de la caractéristique est limitée à la partie droite comprise entre la courbure inférieure (point K) et le point L où commence à se manifester le courant de grille.*

FIG. 2. *En classe B, le point de repos est choisi au pied de la caractéristique (point B). De plus, la tension d'attaque est suffisante pour rendre la grille positive par moment.*



tage symétrique (ou push-pull) pour reproduire la période complète. L'emploi d'un tel montage est donc absolument indispensable pour la reproduction sonore.

La présence du courant de grille suppose naturellement la production d'une certaine puissance nécessairement produite par l'étage qui fournit la tension d'attaque. Il faut donc que le montage soit étudié pour éviter la production d'une distorsion excessive.

De plus, les variations de puissance instantanées empruntées à l'alimentation pouvant être considérables, il faut que la résistance interne de la source anodique soit très faible : c'est un problème difficile à résoudre simplement. Il faut aussi que la tension de polarisation soit parfaitement fixée.

Définition de l'amplification en classe C.

Le principe se comprend immédiatement en examinant la figure 3. La polarisation est nettement plus importante que celle qui correspond à la coupure (en anglais : *cut-off*). Elle est de Vg dans l'exemple choisi et le point de repos est C. Il en résulte qu'une faible tension d'attaque serait insuffisante pour provoquer l'apparition du courant d'anode. Aussi prévoit-on une très forte tension d'attaque, non seulement suffisante pour provoquer le passage d'un courant d'anode, mais encore pour conduire le point de fonctionnement très loin dans la région des tensions positives.

Il en résulte que l'alternance négative est supprimée *ainsi qu'une partie de l'alternance positive*. L'intensité d'anode est constituée par des impulsions séparées par une durée supérieure à une demi-période. Le cycle alternatif correspond à 360° (ou 2π) une alternance correspond à 180° (ou $\pi\pi$) l'angle de passage du courant d'anode est ainsi Θ (lettre grecque thêta) toujours inférieur à 180°.

Dans ces conditions, même avec deux tubes amplificateurs travaillant symétriquement, il est impossible d'éviter une distorsion considérable. L'emploi de l'amplification en classe C est limité à des cas spéciaux d'amplification de haute fréquence.

La charge est un circuit accordé.

Nous avons représenté sur la figure 4 un montage d'amplification en classe C. Il s'agit d'amplifier des courants de haute fréquence. Les émetteurs modernes comportent un grand nombre d'étages de cette sorte. En effet, il est impossible d'utiliser directement des auto-oscillateurs de grande puissance car la stabilité de la fréquence serait tout à fait insuffisante. Pour atteindre la très grande précision imposée par les conventions internationales, il n'est pas d'autres moyens que d'utiliser un étage oscillateur piloté par un cristal de quartz. Mais cet étage ne peut fournir qu'une très faible puissance. Il est donc suivi d'une série de circuits analogues à celui qui a été représenté sur la figure 4. Pour d'évidentes raisons, il est du plus haut intérêt d'atteindre un rendement aussi élevé que possible. C'est ce qui permettra le montage en classe C.

On observera, sur la figure 4, que la charge anodique est constituée par un circuit oscillant. Excité par les impulsions du courant d'anode, celui-ci *reconstituera les oscillations sinusoïdales*. Pour qu'il en soit bien ainsi, il faut naturellement que les deux circuits, celui de la grille, comme celui de l'anode soient accordés sur la fréquence qu'il s'agit d'amplifier.

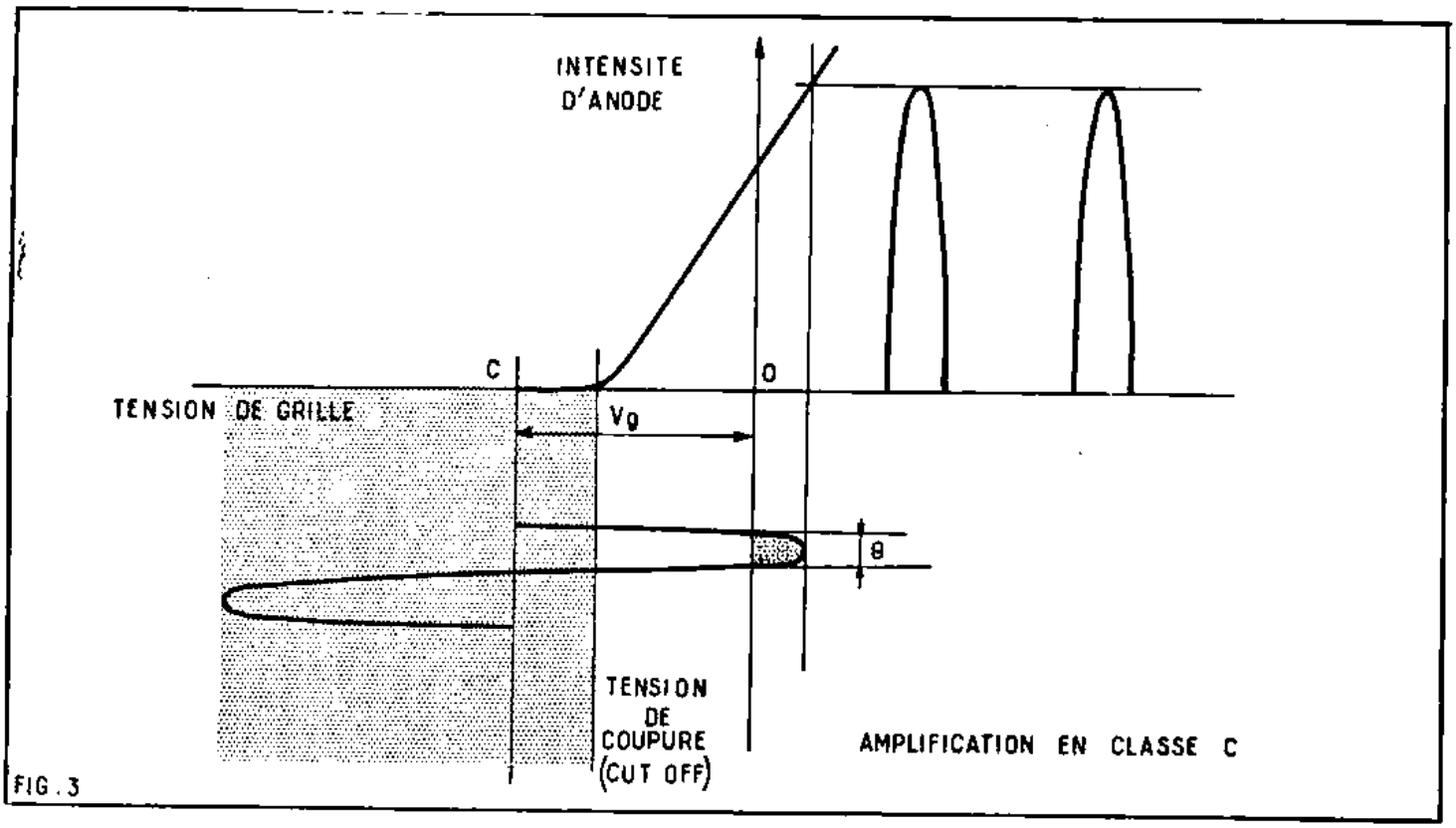


FIG. 3. — *En* classe C, *le point de repos est choisi au-delà du point d'annulation du courant d'anode (point C). De plus, la tension d'attaque est suffisante pour rendre la grille positive par moment.*

On peut exactement comparer le mode de fonctionnement, à l'expérience représentée sur la figure 5. En donnant des chocs

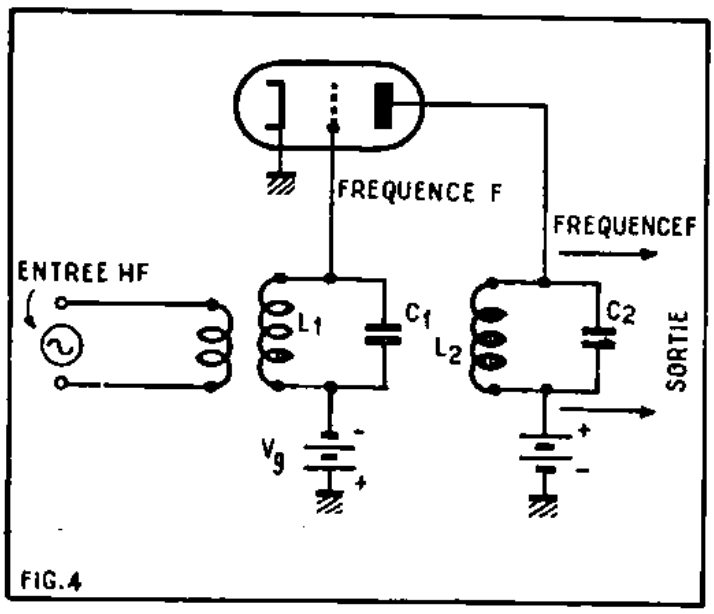


FIG. 4. — *Principe de l'amplification en classe C. La charge d'anode est constituée par un circuit accordé sur la fréquence de fonctionnement.*

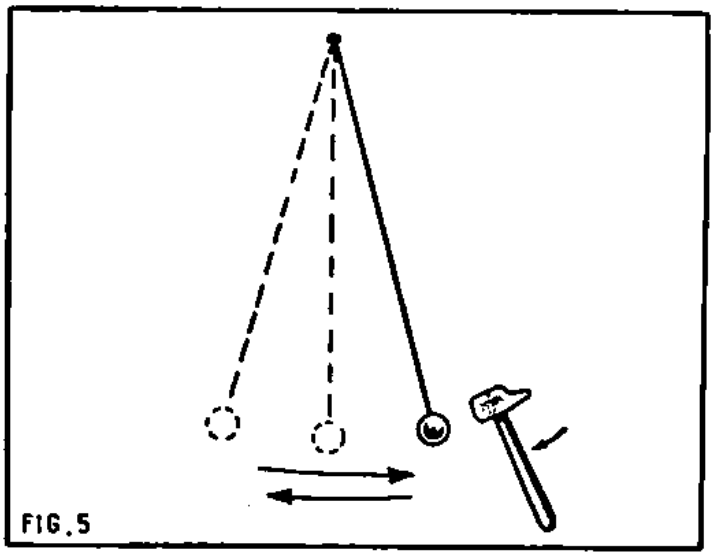


FIG. 5. — *Dans le montage de la figure* 4, *le circuit accordé reçoit des impulsions de courant qui sont en phase avec ses oscillations propres. De la même manière, on peut entretenir les oscillations d'un pendule au moyen d'impulsions mécaniques ou de percussions appliquées au moment convenable.*

convenablement rythmés à la masse d'un pendule, on peut obtenir des oscillations parfaitement régulières. Les coups de marteau représentent les impulsions de courant anodique. Le pendule représente le circuit accordé. Pour que l'expérience réussisse, il faut évidemment que la période des impulsions d'entretien soit exactement celle du pendule.

Polarisation par courant de grille.

Dans le montage donné comme exemple sur la figure 4, nous avons supposé que la polarisation était fournie par une source fixe V_g. En pratique on préférera souvent

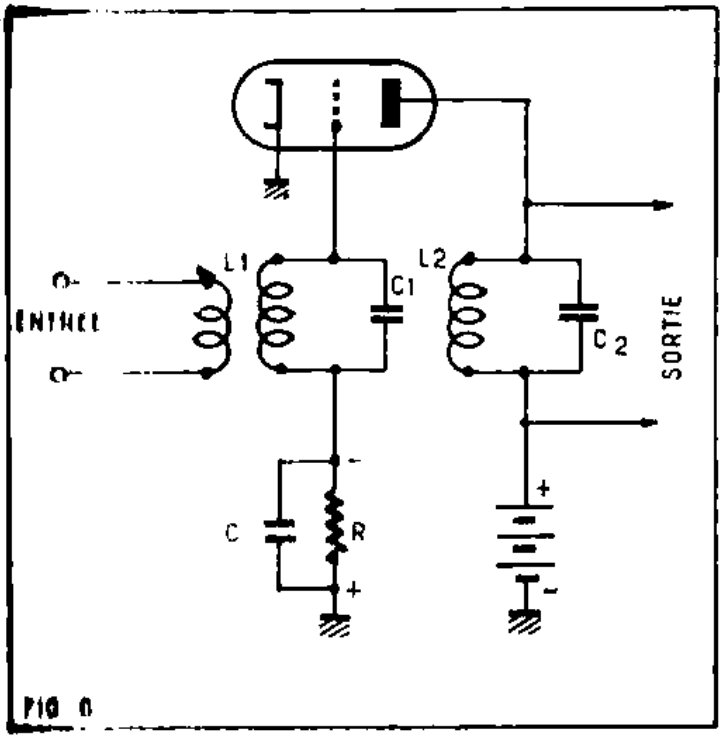


FIG. 6. *La polarisation pour le fonctionnement en classe C peut être obtenue au moyen d'une résistance insérée dans le circuit de grille puisque ce dernier est le siège d'un courant unidirectionnel.*
Les impulsions unidirectionnelles sont intégrées, c'est-à-dire transformées en courant continu grâce à la présence du condensateur.

utiliser le courant de grille pour obtenir la polarisation (*fig.* 6). Celui-ci traversant la résistance R provoque l'apparition d'une tension dans le sens indiqué sur le schéma. Pour éviter l'effet de contre-réaction, la résistance R est shuntée par un condensateur C dont l'impédance doit être négligeable par rapport à R aux fréquences d'utilisation.

On préférera souvent le circuit de la figure 7 qui est absolument équivalent, sauf en ce qui concerne le circuit accordé. En effet, dans ce second cas, une des extrémités du circuit résonnant est mise à la terre, ce qui peut présenter des avantages pratiques non négligeables.

Le circuit figure 8 est encore à peu près équivalent. Toutefois, la position de la résistance est différente. Dans de nombreux cas, ce dernier montage peut présenter des avantages non négligeables.

Dans tous les montages précédents, il est certain que la valeur de la polarisation obtenue dépend de l'amplitude de la tension d'attaque. Il ne peut en être autrement, puisque la valeur moyenne du courant de grille est précisément déterminée par cette amplitude. Il faut, bien entendu, déterminer la valeur de R, en fonction du courant de grille, pour obtenir la polarisation voulue. C'est la valeur de cette polarisation qui détermine la grandeur de l'angle Θ, paramètre essentiel du fonctionnement.

Le rendement et la puissance.

Dans ce mode de fonctionnement, le rendement dépasse largement la valeur correspondant au fonctionnement en classe B. On peut, en effet, atteindre et dépasser 85 %.

Ce rendement est d'autant plus grand que l'angle Θ est plus petit. Il atteindrait 100 % à la limite, c'est-à-dire quand l'angle Θ serait nul... Mais à ce moment-là la puissance produite par l'étage serait nulle... ce qui lui enlèverait toute raison d'être.

Si l'angle Θ était de 180°, on retomberait dans le cas de l'amplification en classe B

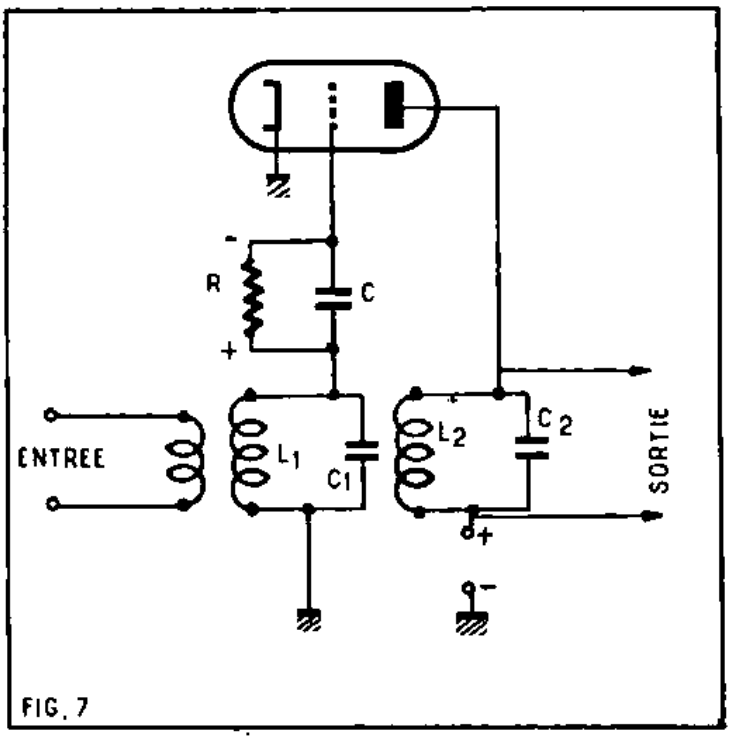


FIG. 7. - - *Ce montage équivaut à celui de la figure 6. Toutefois, on remarquera qu'une des extrémités du circuit accordé est au potentiel de la masse, ce qui peut présenter des avantages pratiques importants.*

FIG. 8. — *Ce montage équivaut encore à celui de la figure 6.*

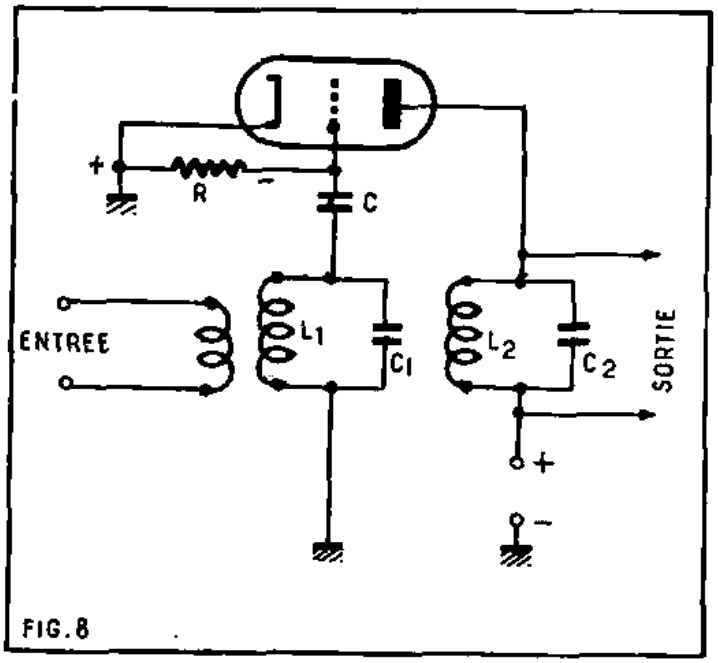


FIG.8

et le rendement théorique serait légèrement supérieur à 75 %. Dans ce cas, la puissance produite par le tube serait maximale.

Il faut donc savoir choisir... Ce choix est d'ailleurs déterminé entièrement par la manière dont le problème est posé. Pour l'utilisateur d'une station d'émission, il est fort intéressant d'avoir un bon rendement énergétique car la consommation de puissance électrique est moindre pour une puissance de rayonnement donnée. Mais il est également de la plus haute importance de tirer le maximum de puissance d'un tube amplificateur donné. Les tubes d'émissions sont des engins fort coûteux et il serait absurde de ne tirer que quelques watts d'un tube pouvant fournir 50 kW, sous prétexte que le rendement est alors voisin de 100 %.

Les oscillateurs fonctionnent toujours en classe C.

L'emploi de l'amplification en classe C est-il donc toujours réservé à l'émission ? Pas du tout. On peut même affirmer que, dans tout récepteur, il y a au moins un étage qui fonctionne en classe C. Cet étage est le tube fournissant les oscillations locales du changeur de fréquence.

En effet, le montage de base correspond à la figure 9, laquelle représente le même montage que les figures précédentes, à ce détail près que le circuit d'anode est couplé avec le circuit de grille.

Il en résulte qu'un étage oscillateur est un étage en classe C qui fournit sa propre excitation. Toutes les conditions exposées plus haut sont parfaitement respectées.

Ainsi, il y a un courant de grille. Il est bien facile de s'en assurer en branchant un microampèremètre (ou une boîte de contrôle) comme nous l'indiquons sur la figure 9 *b*. Pour éviter de perturber le fonctionnement, il faut brancher l'appareil du côté de la masse.

Nous pourrons ainsi déterminer, par exemple, que la valeur moyenne (c'est ce que mesure l'appareil à cadre) du courant de grille est de 200 μA. Par une simple application de la loi d'ohm, nous en déduirons que la chute de tension dans la résistance R, de 50 000 Ω est de :

$$0{,}0002 \times 50\,000 = 10 \text{ V.}$$

Dans les conditions d'alimentation du tube amplificateur, il nous sera facile de vérifier que la tension de coupure est, par exemple, de 4,5 V. En conséquence, avec une polarisation de 10 V aucun courant anodique ne devrait pouvoir circuler... Or, en plaçant un appareil de mesure dans le circuit d'anode nous observerons que l'intensité de courant est de plusieurs milliampères...

Il s'agit donc bien indiscutablement d'un fonctionnement en classe C, c'est d'ailleurs grâce à cela qu'on peut obtenir un fonctionnement très stable et que la fréquence pro-

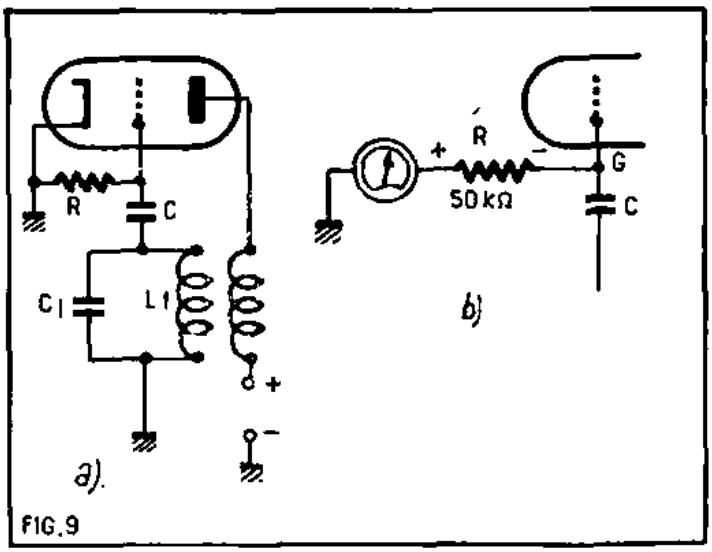


FIG.9

FIG. 9. — *Un circuit générateur d'oscillations fonctionne généralement en classe C. On peut s'en rendre compte en mesurant l'intensité de courant qui traverse R (b). Il ne faut pas tenter de mesurer directement la tension continue au point G, en effet, on risquerait de faire « décrocher » les oscillations.*

dulle peut être presque totalement indépendante des variations d'alimentation.

Les formes des courants de grille et d'anode.

Nous avons admis précédemment et en particulier sur la figure 3, que le courant d'anode affectait la forme d'une fraction de sinusoïde. En réalité, on peut observer expérimentalement qu'il n'en est pas ainsi, même si la caractéristique du tube est droite.

On observe, par exemple, qu'au lieu de suivre la forme sinusoïdale, l'intensité d'anode est conforme à la figure 10 *a*. Elle

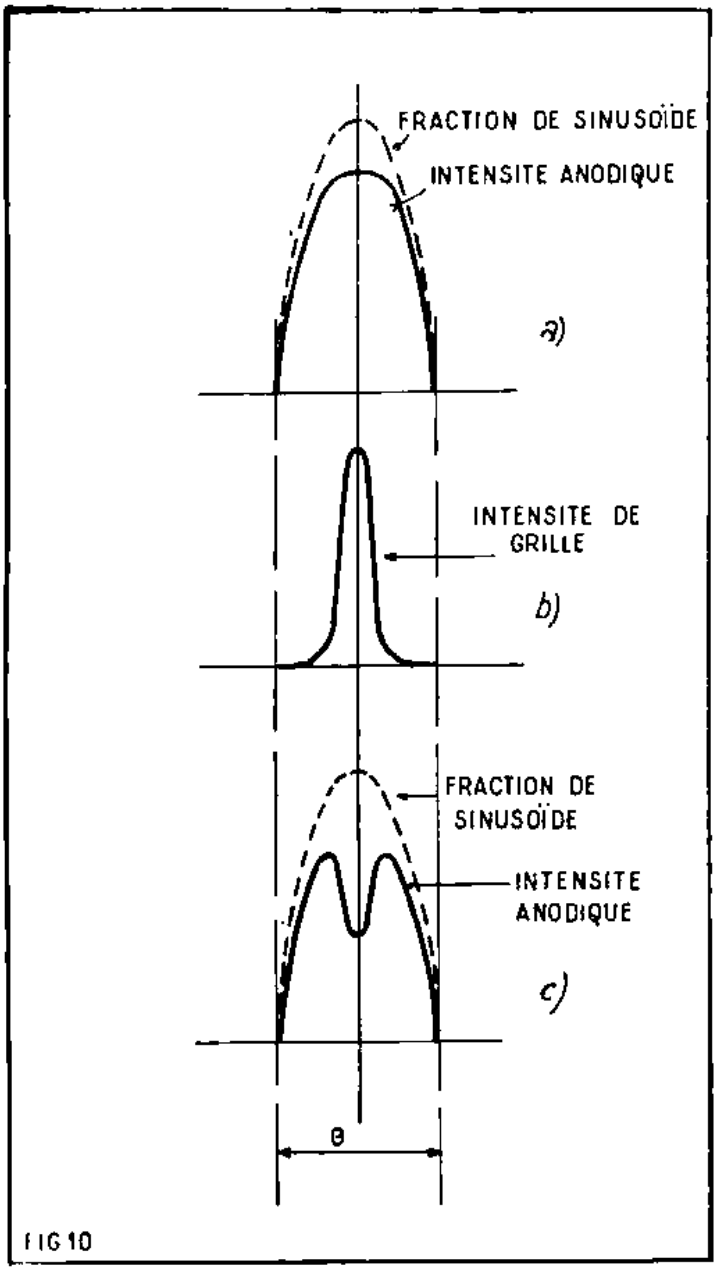


FIG. 10. — *Forme d'onde :* a) *de l'intensité d'anode qui ne suit pas la forme sinusoïdale (en pointillé).*

b) *De l'intensité de grille ;*

c) *De l'intensité d'anode quand l'attaque de grille est de très grande amplitude.*

prend sensiblement l'allure d'une impulsion presque rectangulaire.

Ce phénomène est facile à comprendre si l'on considère la forme de l'intensité de grille (*fig.* 10 *b*). Celle-ci est naturellement nulle au moment où apparaît le courant d'anode, elle s'amorce dès que la grille devient positive, puis croît de plus en plus. Il est évident que les électrons arrêtés au passage par la grille ne peuvent parvenir jusqu'à l'anode, ce qui contribue naturellement à une diminution de l'intensité d'anode. Cet effet est d'autant plus net qu'au moment de la crête de tension d'attaque se produit une plus grande chute de la tension instantanée d'anode. C'est évidemment à ce moment-là que se produit la chute de tension maximale dans la charge, c'est-à-dire dans le circuit accordé d'anode.

Enfin un phénomène supplémentaire peut encore provoquer un renforcement de cet effet si la tension de grille d'attaque atteint des valeurs très élevées. L'anode est alors le siège d'une émission d'électrons secondaires. Ceux-ci sont attirés vers la grille dont la tension instantanée peut être plus élevée que la tension instantanée d'anode. Il en résulte alors une baisse considérable du courant anodique.

Utilisation de l'amplification en classe C.

Nous avons expliqué plus haut que, pratiquement, tous les circuits oscillateurs fonctionnent en classe C. En dehors de cela, ce mode d'amplification est utilisé surtout dans les émetteurs. Il faut toutefois préciser qu'il ne peut pas convenir pour des émissions *modulées en amplitude*. Il suffit d'examiner la figure 2 pour voir que les « creux » de la modulation ne seraient pas reproduits, même si le circuit de charge était constitué par un ensemble résonnant.

Il faut donc, dans un émetteur à modulation d'amplitude, n'utiliser l'amplification en classe C que dans les étages précédant la modulation.

Au-delà, il est possible d'utiliser l'amplification en classe B qui prend alors, dans ce cas, le nom *d'amplification linéaire*. Le rendement en est nécessairement plus faible.

En revanche l'amplification en classe C convient parfaitement *pour tous les étages*, jusque et y compris l'étage de sortie quand il s'agit d'émissions faites en *modulation de fréquence ou de phase*. Dans les deux cas, en effet, l'amplitude demeure absolument constante (*fig.* 12). Cette possibilité constitue un avantage non négligeable de la

Multiplication de fréquence.

Nous avons remarqué plus haut que le circuit d'anode n'était pas parcouru par une intensité de courant sinusoïdale, mais par des impulsions plus ou moins déformées.

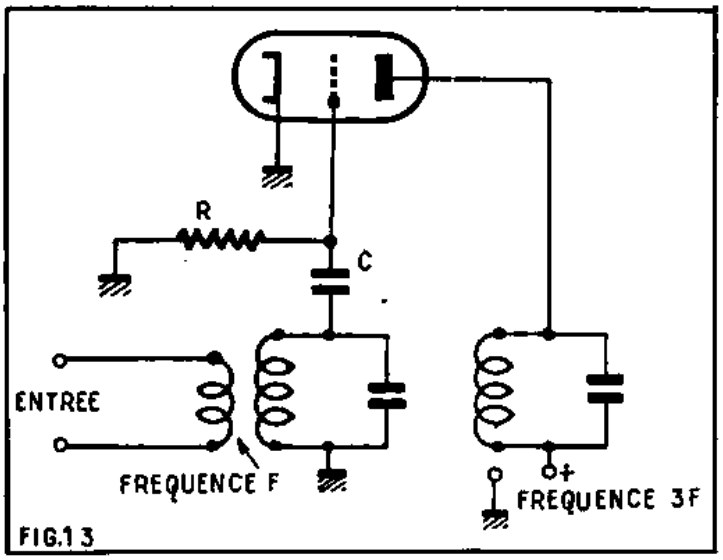


FIG. 13. — *Dans un étage multiplicateur de fréquence, le circuit d'anode est accordé sur un multiple exact de la fréquence de la tension d'attaque.*

Cela veut dire évidemment que l'intensité comporte de nombreuses composantes harmoniques. On sait, en effet, que toute intensité périodique non sinusoïdale de fréquence F peut être considérée comme étant la somme d'intensités sinusoïdales dont les fréquences sont des multiples exacts de F. On trouve donc des composantes dont les fréquences sont : 2F, 3F, 4F, 5F, etc. On peut utiliser cette remarque pour constituer des multiplicateurs de fréquence. Le schéma est, à peu de chose près, celui d'un étage en classe C, à cette différence près que le circuit d'anode est accordé sur un multiple de la fréquence du circuit de grille. Ainsi, le schéma de la figure 13 représente *un étage tripleur de fréquence.*

Il va sans dire que l'amplification en puissance ainsi obtenue est moins importante que s'il s'agissait d'un étage simple. Le rendement est moins bon. On cherche les meilleures conditions de fonctionnement en agissant sur l'angle Θ, c'est-à-dire en réglant convenablement l'amplitude de la tension d'attaque et la grandeur de la polarisation de grille.

Le rendement devient de moins en moins grand ainsi que la puissance utile que peut fournir un tube donné à mesure qu'on veut obtenir un facteur de multiplication plus élevé. Cela veut dire que l'amplitude des harmoniques décroît à mesure que leur rang devient plus élevé. C'est une règle à peu près générale. C'est pour cette raison qu'on ne dépasse pratiquement jamais une multiplication par 5. Il est beaucoup plus avantageux de prévoir plusieurs multiplications successives.

Principe d'un émetteur moderne.

Le procédé de multiplication de fréquence dont nous venons d'expliquer le principe est largement appliqué dans les émetteurs modernes de grande puissance, comme ceux qui sont employés en radiodiffusion par exemple. Il s'agit d'obtenir une fréquence ou — ce qui revient au même — une longueur d'onde parfaitement stable.

La fréquence doit non seulement ne pas varier au cours du fonctionnement, mais elle doit être exacte à *moins d'un millionième près.* Une telle précision, reportée dans le domaine de la chronométrie, correspondrait à une montre dont la variation serait de l'ordre de 15 s par année...

Ce résultat extraordinairement précis peut être obtenu en utilisant les propriétés piézo-électriques et élastiques du quartz. Le chef d'orchestre est un cristal convenablement taillé qui ne peut guère contrôler qu'une puissance de l'ordre du watt. D'autre part, il y a intérêt à tailler des cristaux correspondant à des fréquences relativement basses : la stabilité est meilleure.

Aussi on peut représenter la disposition schématique d'un émetteur moderne comme sur la figure 14.

L'étage piloté par quartz est réglé sur la fréquence F. Il est suivi d'un étage séparateur donnant un très faible gain, mais évitant le retour des courants de haute fréquence vers le quartz (ce qui pourrait l'endommager).

On trouve ensuite des étages multiplicateurs par 3, par 2, puis par 3 (dans l'exemple choisi). Ces étages fournissent un gain en puissance relativement faible. Ils sont montés comme nous l'indiquons sur la figure 13.

Lorsque la fréquence désirée est atteinte (ici 18 × F) on prévoit le nombre d'étages nécessaires pour atteindre la puissance que l'on veut donner à l'étage final. La modulation n'est — dans le cas présent — introduite que dans l'étage de sortie.

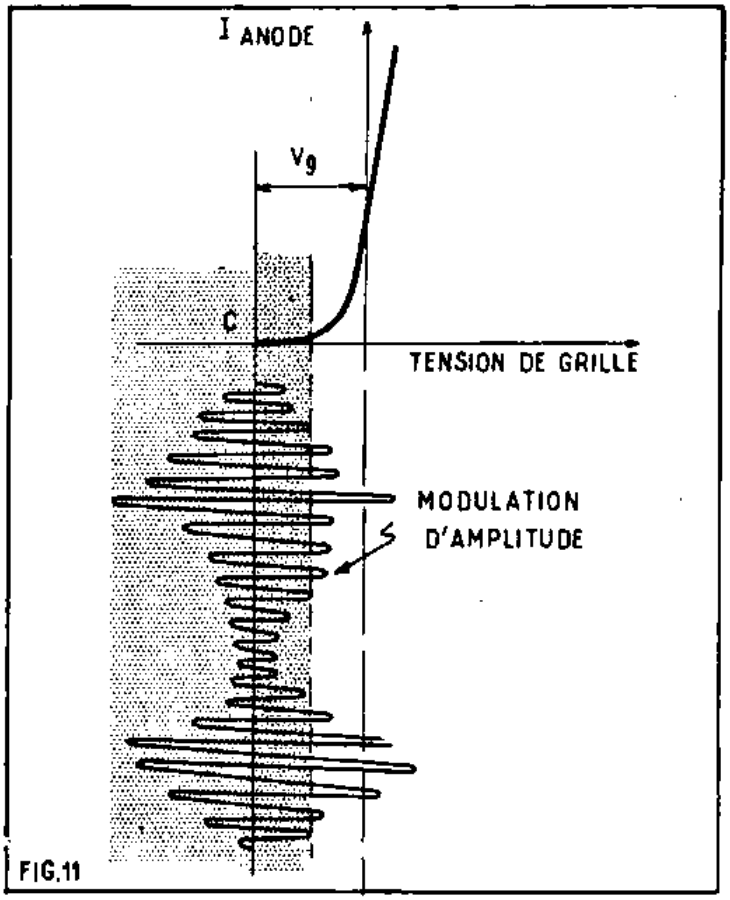


FIG. 11. — *L'amplification en classe C ne peut convenir pour des courants à haute fréquence modulés en amplitude. Les « creux » de la modulation ne seraient pas transmis.*

modulation de fréquence par rapport à la modulation d'amplitude.

Anomalies de fonctionnement.

La grille, recevant de très grandes pointes de tension positives, est ainsi frappée par des électrons à grande vitesse. Elle peut être alors le siège d'une émission secondaire d'électrons. Ceux-ci peuvent donner lieu à un courant inverse de grille pour peu qu'un champ électrique convenable existe au voisinage de l'électrode.

Ainsi le courant moyen de grille est la différence entre deux intensités de signe contraire constituées, d'une part, par les électrons primaires et, d'autre part, par les électrons secondaires. C'est cette intensité moyenne que révélera un appareil de mesure introduit dans le circuit.

Or, il peut se produire que, malgré que ce courant soit faible, la dissipation de grille soit excessive. En effet : elle reçoit des électrons primaires à très grande vitesse alors qu'elle libère des électrons secondaires à faible vitesse. Même si les quantités d'électricité reçues et cédées par seconde sont égales, il n'en résulte pas moins que la grille doit alors dissiper une très grande énergie.

Si le facteur de multiplication secondaire est supérieur à 1, il se peut même que le courant moyen de grille soit inversé.

Dans ces conditions, si la polarisation est obtenue par l'intermédiaire du courant de grille, il est clair que l'électrode est portée à une tension positive. Ce fonctionnement particulier peut être fort dangereux pour le tube électronique.

Notons qu'il est facile de prendre des mesures de sécurité. On peut prévoir, par exemple, un élément diode aux bornes de la résistance de polarisation. Celle-ci est pratiquement mise en court-circuit quand la tension a tendance à s'inverser.

L'intensité traversant le redresseur de protection peut commander un relais qui coupe automatiquement l'alimentation de l'étage.

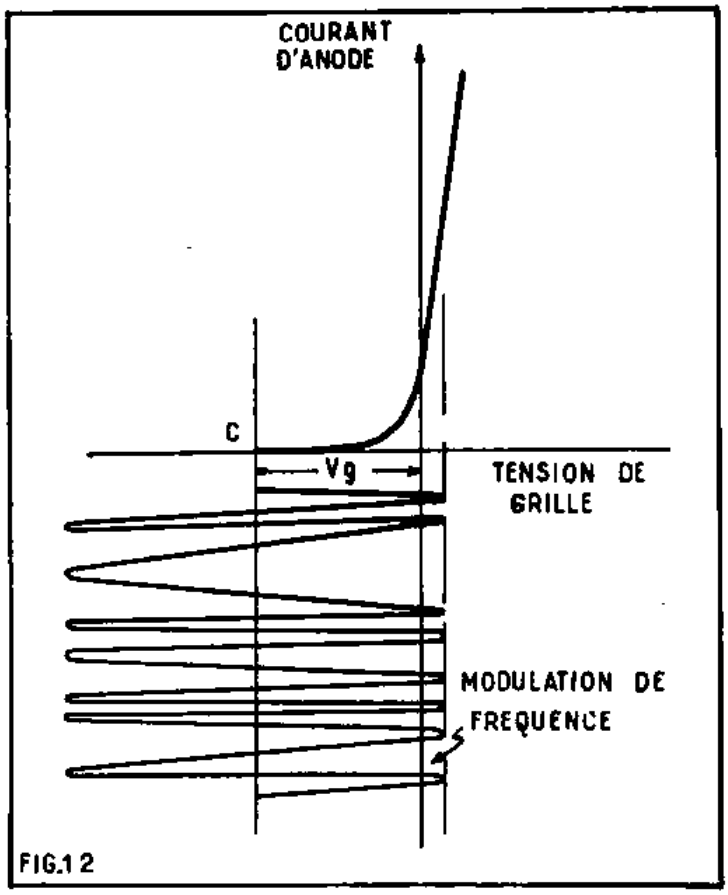
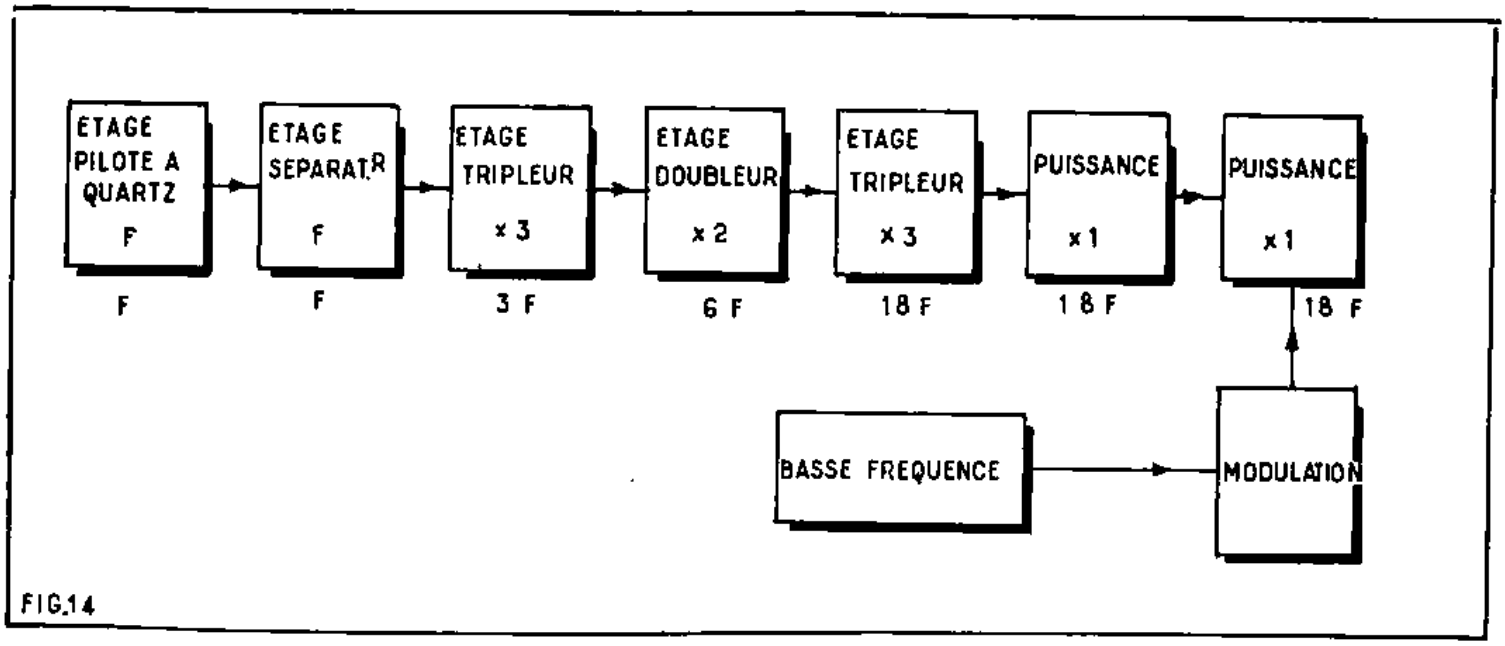


FIG. 12. — *L'amplification en classe C convient parfaitement pour des courants modulés en fréquence ou en phase.*



La puissance d'excitation d'un étage représente entre 6 et 10 % de sa puissance nominale. Si l'étage de sortie fournit une puissance de 1 kW, il faut qu'il soit précédé par un étage qui peut donner entre 50 et 100 W. Ce dernier est à son tour excité par un étage de 10 W, etc.

Dans une chaîne amplificatrice comme celle de la figure 14, il est évident que les différentes fréquences conservent nécessairement le même rapport. Ainsi, la précision relative de la fréquence 18 × F est exactement la même que celle de la fréquence F qui est contrôlée d'une manière rigoureuse par le cristal de quartz.

L'amplificateur classe C en modulation de fréquence.

Nous avons reconnu plus haut que l'amplification en classe C peut parfaitement convenir pour les courants modulés en fréquence ou en phase.

Il en résulte que le schéma d'un émetteur en modulation de fréquence est tout à fait différent de celui d'un émetteur à modulation d'amplitude. En effet, la modulation est introduite dès le début et avec une très faible déviation de fréquence. On ne pourrait absolument pas obtenir du premier coup, les déviations de ± 75 kHz qui caractérisent les émissions de radiodiffusion. Pour que la déviation soit parfaitement linéaire, il faut nécessairement qu'elle soit faible.

FIG. 14. — *Disposition schématique des circuits d'un émetteur à modulation d'amplitude.*

On fait donc subir une faible déviation à une fréquence de départ qui est beaucoup plus petite que celle qu'on veut finalement obtenir. Après quoi, on fait subir un très grand nombre de multiplications successives. Le coefficient de multiplication total *peut être de plusieurs centaines.*

Si ce coefficient est, par exemple, de 200, il est certain qu'une déviation de fréquence finale de 75 kHz ne correspondra plus, au départ, qu'a une déviation de 75 000 /200 ou 375 Hz, ce qui est relativement facile à obtenir.

Dans la modulation de fréquence il n'y a pas d'onde porteuse, il y a une fréquence centrale. L'amplitude de la composante correspondante varie constamment. Mais sa fréquence doit demeurer rigoureusement constante. C'est absolument essentiel si l'on veut obtenir une transmission à haute fidélité musicale. Le procédé dont nous venons d'esquisser le principe permet précisément de stabiliser cette fréquence au moyen d'un oscillateur piloté par quartz...

On peut d'ailleurs considérer qu'il est pour le moins curieux de stabiliser rigoureusement une fréquence dans un procédé où il s'agit précisément de faire varier cette... fréquence. La technique présente parfois de ces paradoxes étonnants.

L'AMPLIFICATION CLASSE A/B

Nous avons étudié successivement les amplificateurs en classe A, en classe B et en classe C.

Il existe aussi des classes d'amplification intermédiaire : classe AB1 et classe AB2.

Réflexions préliminaires.

La définition des différentes classes d'amplification a été *normalisée par les techniciens* des Etats-Unis. Parmi ces définitions nous trouvons les classes AB1 et AB2. Toutefois, il est juste d'ajouter que certains techniciens français ont prétendu que ces classes intermédiaires de fonctionnement n'avaient aucune existence réelle. Pour eux, un amplificateur fonctionne en classe A ou il fonctionne en classe B...

La classe AB1 se confond avec la classe A et la classe AB2 se confond avec la classe B.

A notre avis, il ne s'agit là que d'une querelle de mots. Et, comme toujours, quand il en est ainsi, on peut constater que les deux parties ne parlent pas des mêmes choses.

En effet, si l'on considère le *rendement énergétique*, on peut constater que la classe A et la classe AB1 peuvent être confondues. Elles sont l'une et l'autre caractérisées par une assez mauvaise utilisation de l'énergie fournie par la source d'alimentation.

Toutefois et spécialement dans les amplificateurs symétriques (ou push-pull) la classe AB1 apporte une nette amélioration de la qualité de reproduction et — en même temps — permet de tirer une puissance utile nettement plus grande d'un étage amplificateur.

Ces deux remarques justifient — nous semble-t-il — la définition de la classe AB1...

Définition de la classe AB.

Précisons immédiatement que cette classe de fonctionnement ne s'applique qu'aux amplificateurs symétriques ou push-pull. Nous raisonnerons cependant, pour l'instant, sur une seule courbe caractéristique (*fig.* 1).

Dans le fonctionnement en classe A, on limite les excursions du point figuratif aux parties droites de la caractéristique. Le malheur, c'est que, pour beaucoup de tubes électroniques, il n'y a pas de parties vraiment droites. Et cette remarque est encore plus vraie quand elle s'applique aux tubes modernes à très grande pente. On constate que plus la pente est élevée plus l'allure de la caractéristique (courant d'anode en fonction de tension de grille) devient parabolique. En réalité, il ne s'agit pas d'une parabole, mais d'une courbe exponentielle correspondant à la puissance 3/2, ou 1,5.

Si l'on veut réellement obtenir un fonctionnement en classe A, on est dans l'obligation de n'utiliser qu'une portion de caractéristique très peu étendue, comme la zone MN (*fig.* 1).

Au-delà de M, la courbure devient très accentuée et au-delà de N le courant de grille fait son apparition.

Le point A correspond alors à une intensité de repos relativement grande, le rendement est faible, la dissipation de puissance est élevée et le tube chauffe beaucoup.

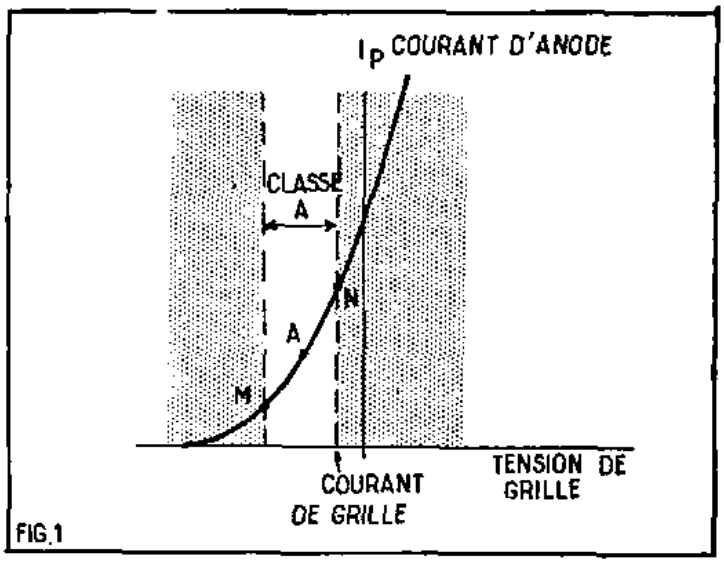


FIG. 1. — *Limites de fonctionnement en classe A. Le point de repos est choisi au milieu d'une région droite limitée vers le bas par la courbure inférieure, vers le haut par la zone où commence à se manifester le courant de grille. Cette zone est très peu étendue. Le tube électronique est donc mal utilisé.*

Dans l'amplification en classe AB, on choisit tout simplement un point de repos situé notablement plus bas que le point A. Pratiquement, cela revient à augmenter la tension de polarisation négative du tube amplificateur.

Si l'amplificateur fonctionne *sans courant de grille*, il s'agit du régime de fonctionnement AB1 ou encore AB'.

Si l'amplificateur fonctionne avec *courant de grille*, il s'agit de la classe AB2 ou, encore AB''.

Le fonctionnement en classe AB1.

Le diagramme de fonctionnement correspond à la figure 2. La valeur de la tension d'attaque est limitée par la nécessité d'éviter le courant de grille. Il faut donc, qu'à aucun moment, la tension de grille ne puisse prendre des valeurs positives. Bien plus, il faut même qu'il reste toujours une certaine valeur de polarisation. En effet, le courant de grille commence généralement à se manifester pour — 0,5 V. Là encore, tout dépend du type utilisé. Dans les tubes à très grande pente, la grille est placée très près de la cathode — il en résulte que le courant de grille se manifeste plus tôt et qu'il est relativement plus intense. On voit distinctement sur la figure 2 que la variation de pente de caractéristique dans la zone de fonctionnement est importante. Il en résulte que le gain fourni par l'amplificateur varie avec l'amplitude de la tension. En termes plus clairs, il y a production de distorsion.

L'alternance positive KLM provoque la variation d'intensité K'L'M' alors que l'alternance négative MNO provoque la variation M'N'O'. Un simple coup d'œil suffit pour remarquer que ces deux variations ne sont pas égales.

Une distorsion qui peut se constater aussi facilement se traduit par un résultat acoustique désastreux.

Du fait du manque d'égalité des deux alternances, il résulte que la valeur moyenne de la variation d'intensité d'anode n'est pas nulle, comme cela se produit dans l'amplification en classe A. Si l'on réalise le montage de la figure 3, utilisant un tube pentode de puissance, on peut facilement constater que les valeurs moyennes de l'intensité d'anode I_a et celle de la grille écran I_{g2} augmentent au cours du fonctionnement. Ces courants sont d'autant plus intenses que la puissance fournie par l'étage est plus grande.

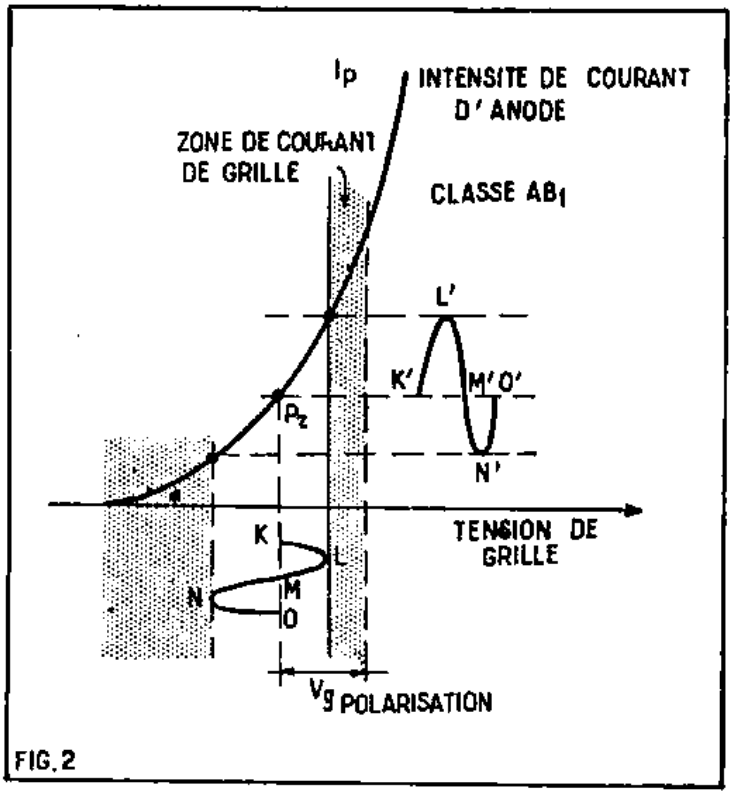


FIG. 2

FIG. 2. — *En classe AB le point de fonctionnement au repos est situé au commencement de la courbure inférieure de la caractéristique. Il en résulte que les deux alternances ne sont pas amplifiées de la même manière.*

Notez bien que cela ne signifie pas que la dissipation totale produite par le tube amplificateur est plus grande, car, en même temps que s'accroît la puissance délivrée par la source anodique Va la puissance modulée utilisée dans le haut-parleur devient plus importante.

Fonctionnement en classe AB2.

Le montage de la figure 3 permet d'obtenir le fonctionnement en classe AB2 aussi bien qu'en classe AB1. Il ne faut même pas changer la valeur de la polarisation de grille, mais tout simplement augmenter l'amplitude de la tension d'attaque.

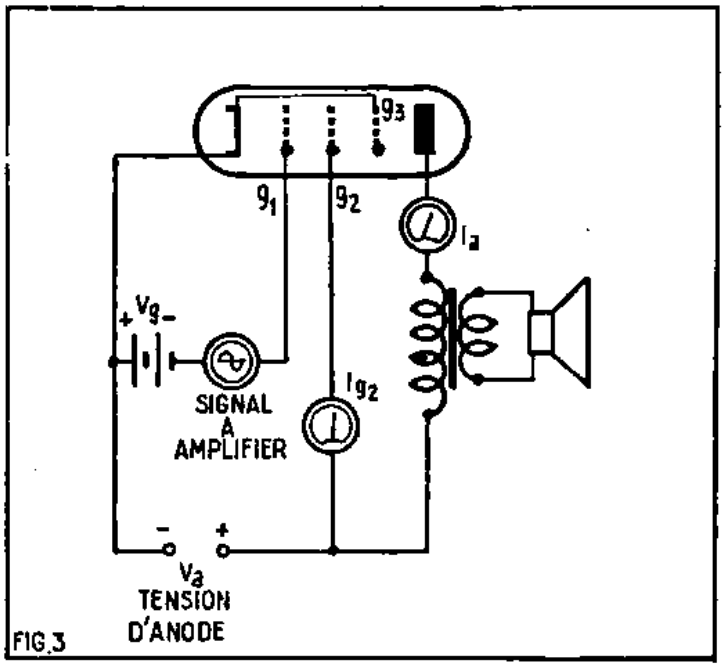
Remarquons immédiatement que cela ne veut pas dire qu'un amplificateur en classe AB1 peut être utilisé en classe AB2. Nous reviendrons plus loin sur ce point important.

Dans le fonctionnement en classe AB2 on constate :

1° La naissance d'un courant de grille dès que le point figuratif franchit la ligne IJ.

2° Le rabotage ou l'élimination d'une partie des alternances négatives, dès que le point figuratif atteint la *tension de coupure* (ou cut-off).

FIG. 3. — *Ce montage permet de contrôler que les intensités d'anode et d'écran augmentent en même temps que la puissance produite par l'étage.*



D'après la forme de l'intensité d'anode représentée figure 4 on peut conclure que la distorsion serait considérable.

A propos du courant grille.

Nous avons déjà exposé les conséquences apportées par la présence d'un courant dans le circuit de grille dans nos articles précédents. Nous pensons qu'il est utile d'y revenir.

Dès que la grille devient positive, la résistance équivalente du circuit cathode grille devient extrêmement faible (de l'ordre de 1 000 Ω et moins pour certains modèles de tubes).

Pour qu'il n'en résulte aucune distorsion il faut évidemment que la résistance du circuit de grille soit beaucoup plus petite. Or, ce n'est pas du tout le cas quand on utilise la liaison classique par résistance et condensateur (*fig.* 5).

La présence de la résistance élevée R dans le circuit de grille produit une chute de tension dans le sens indiqué sur la figure 5 par les signes + et — et se traduit en pratique par le résultat indiqué sur la figure 6. Il faut donc réaliser absolument cette condition que la résistance ohmique de l'élément de liaison dans le circuit de grille soit négligeable. Nous avons déjà indiqué précédemment qu'on pouvait remplacer la résistance par une inductance. On peut aussi utiliser le couplage par transformateur (figure 7).

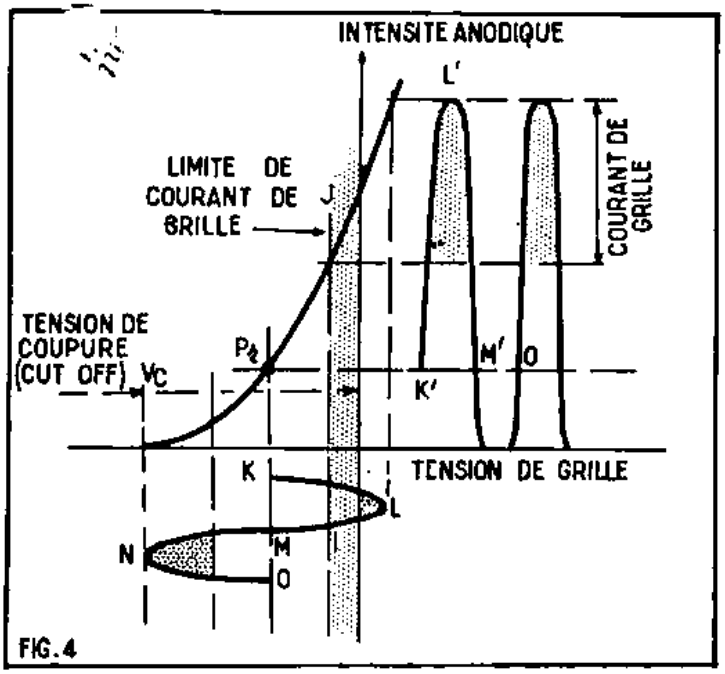


FIG. 4. — *En classe AB2 l'amplitude d'attaque est telle que le point de fonctionnement se déplace d'un côté dans les régions ou se manifeste le courant de grille (IL) et celle où le courant anodique est coupé Ve.*

L'existence du courant de grille entraîne une autre conséquence. La source qui fournit la tension d'entrée doit faire varier la *tension* de grille, elle doit aussi assurer le passage du courant, c'est-à-dire qu'elle doit finalement fournir une certaine *puissance électrique*. Nous ne sommes donc plus en présence d'un simple tube amplificateur de tension : il s'agit d'un tube d'attaque (en anglais tube driver ou conducteur).

Ce qui complique un peu plus les choses, c'est que la puissance ne doit pas être produite d'une manière continue, mais simplement pendant *une fraction d'alternance*. Pour qu'il n'en résulte pas de distorsion,

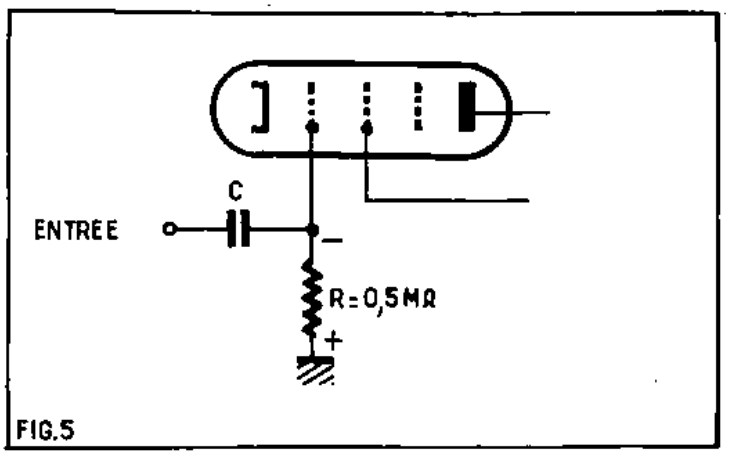
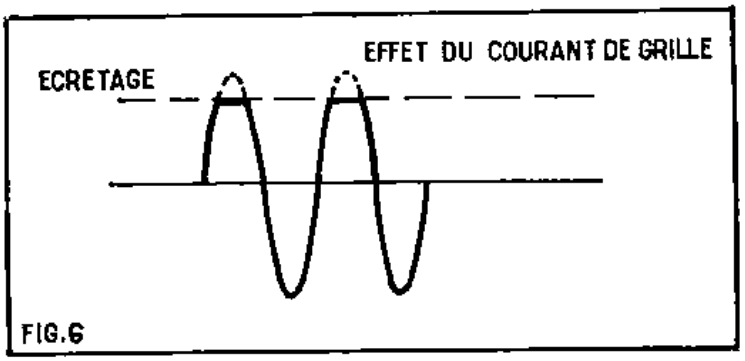


FIG. 5. — *Cette liaison ne peut pas être utilisée quand il y a un courant de grille. Il y aurait une chute de tension excessive dans la résistance R.*

FIG. 6. — *La présence d'un courant de grille dans un circuit résistant amènerait cet effet d'écrêtage.*



il faut, en réalité, que l'étage soit prévu pour fournir beaucoup plus de puissance qu'il ne serait strictement nécessaire.

Il est, en effet, évident que si la tension à amplifier est de très faible amplitude le système fonctionne en classe A. Pour une tension d'entrée un peu plus forte, il fonctionnera en classe AB1. Dans ces deux cas, la puissance fournie par la source de signal sera nulle. Si l'amplitude augmente encore, le système fonctionnera en classe AB2, à partir du moment où le courant de grille commence à se manifester. C'est aussi à cet instant que le tube d'attaque doit fournir une certaine puissance.

Montage symétrique en classe AB.

Considérons un montage symétrique classique — équipé avec des tubes triodes de puissance (*fig.* 8). Les deux tubes reçoivent des tensions d'entrée égales mais déphasées de 180°. Les tensions fournies dans le circuit d'anode présentent le même déphasage — mais elles sont recombinées dans le transformateur de sortie T de manière que leur effet s'ajoute. C'est précisément le principe du montage symétrique.

Pour qu'il s'agisse d'un montage en classe AB, il suffit que la polarisation de grille V_g soit réglée à une valeur appropriée.

Le montage de la figure 8 peut se traduire sous forme d'un schéma équivalent qui nous permet d'en analyser les propriétés avec beaucoup plus de facilité.

Cette « traduction » peut prendre la forme de la figure 9. Les deux tubes amplificateurs sont remplacés par deux générateurs G1 et G2. Le générateur G1 représente le premier tube, travaille dans le circuit AB CD qui comporte un demi-primaire du transformateur et la résistance interne du tube.

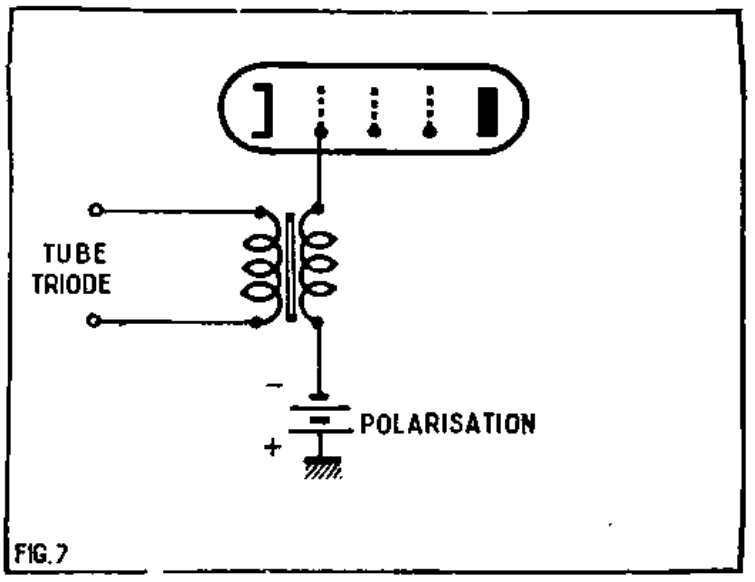


FIG. 7. — *En classe AB2 on utilise la liaison par transformateur. Cela suppose nécessairement que le tube d'attaque est monté en triode. La résistance interne d'un tube pentode est trop élevée pour qu'on puisse le coupler par transformateur avec le tube suivant.*

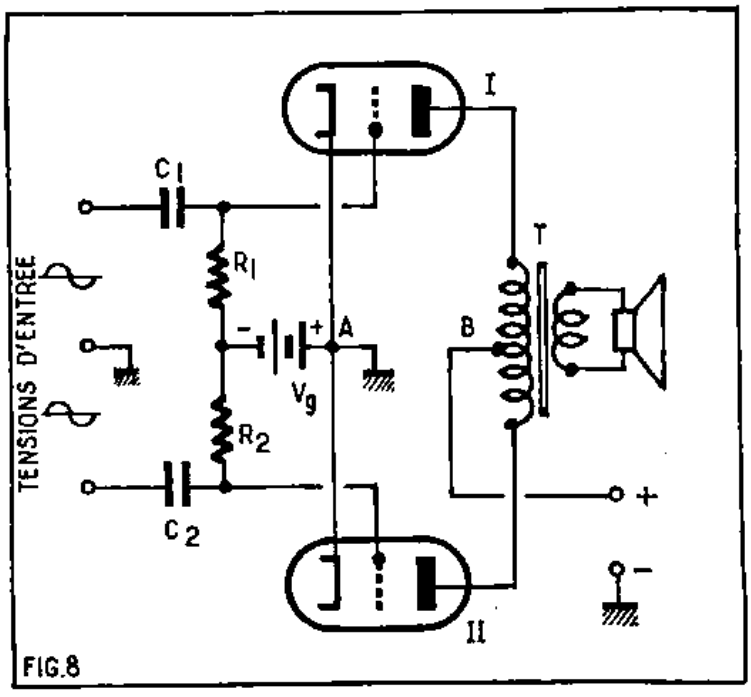


FIG. 8. — *Schéma de principe d'un montage symétrique.*

Le second G2 travaille dans un circuit identique ABEF comportant également une résistance interne et un demi-primaire de transformateur.

Mais, en ce qui concerne les tensions alternatives les deux points A et B du schéma figure 8, ainsi que les deux mêmes points de la figure 9 *sont au même potentiel.* Il en résulte qu'aucune intensité de courant alternatif ne traverse la branche AB ce qui

— soit dit en passant — permet d'expliquer les plus intéressantes propriétés du montage symétrique.

Cette branche ne servant à rien, on peut la supprimer sans que le fonctionnement en courant alternatif soit modifié. On arrive ainsi à la figure 10, qui nous permet de voir le montage symétrique sous un jour nouveau.

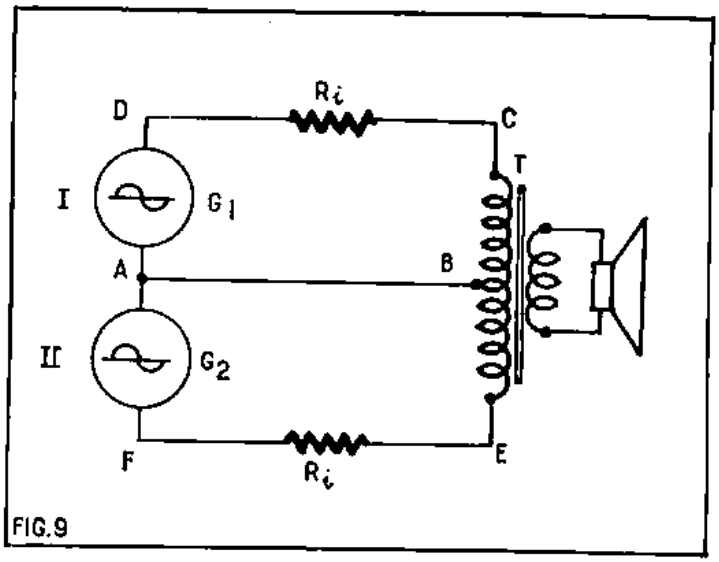


FIG. 9. — *Schéma équivalent d'un montage symétrique analogue à celui qui est représenté sur la figure* 8.

Ce qu'est réellement le montage symétrique.

Ce schéma équivalent nous permet de connaître la véritable essence du montage symétrique et de comprendre ses propriétés les plus caractéristiques.

En réalité, les deux tubes amplificateurs fonctionnent *en série* en ce qui concerne les tensions utiles. Ils sont alimentés *en parallèle* mais amplifient « en série ».

L'impédance « vue » par chacune des lampes amplificatrices ne représente que le quart de l'impédance qui existe — entre les points P1 et P2 ou, comme on dit, de l'impédance « de plaque à plaque ».

Quand un transformateur d'adaptation est prévu pour fournir une impédance de 10 000 Ω de plaque à plaque, il faut comprendre que la charge réelle de chaque tube est de 10 000 /4 c'est-à-dire 2 500 Ω.

Ce schéma équivalent nous conduit directement à l'idée de la caractéristique *composée*, c'est-à-dire de la caractéristique unique pour représenter l'ensemble de la figure 10.

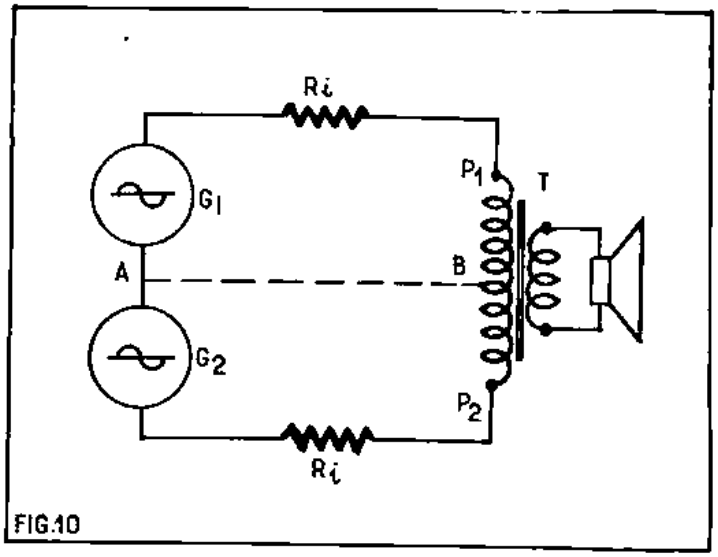


FIG. 10. — *Le schéma équivalent de la figure* 9 *peut se simplifier comme ci-dessus : en effet, la branche AB n'est traversée par aucune intensité alternative.*

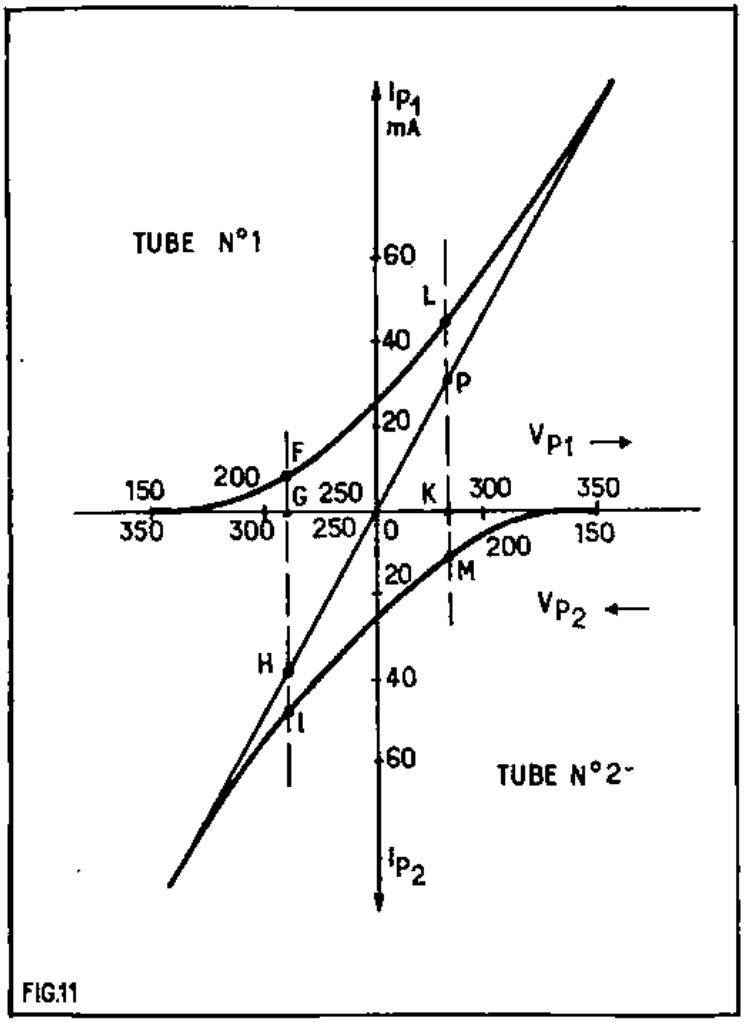
Tracé de la caractéristique composée.

Pour la tension d'anode que l'on veut utiliser, on choisit la valeur de polarisation. On trace alors la caractéristique qui donne la valeur du courant de plaque en fonction de la tension de plaque. C'est ce qui a été fait dans la partie supérieure de la figure 11. C'est la caractéristique relative au tube n° 1.

On fait la même opération pour le tube n° 2, mais en inversant les échelles d'intensité et de tension. Cette inversion est effective, mais de manière à faire coïncider les deux chiffres relatifs à la tension d'anode adoptée. Dans l'exemple de la figure 11 nous avons supposé que cette tension d'anode était de 250 V. Si l'on avait adopté une tension d'anode de 300 V, on aurait fait glisser les deux caractéristiques de manière à mettre en coïncidence les deux chiffres 300.

Pour obtenir un point quelconque de la caractéristique composée, on prend la valeur de l'intensité différentielle de chacun des tubes. Ainsi, pour obtenir le point P, on retranche de KL la valeur KM de l'intensité du tube II. En d'autres termes, LP = KM. De même FG = HI. Pour la valeur de tension d'anode choisie par raison de symétrie la valeur différentielle est nulle. En reliant les points comme HOP, on obtient la *caractéristique composée*. On constate, avec des tubes triodes de puissance, qu'elle est rigoureusement droite si la valeur de polarisation est correctement choisie.

FIG. 11. — *Principe de construction de la caractéristique composée d'un étage symétrique. Le point P est déterminé en remarquant que LP KM. De même HI FG, etc. Si la polarisation est bien choisie, cette caractéristique composée est rigoureusement droite sur la plus grande partie de son étendue.*



C'est justement ce qui explique l'exceptionnelle qualité de reproduction qu'on peut obtenir avec un montage en classe AB correctement réglé, équipé de tubes triodes de puissance.

Si la polarisation est mal choisie on obtiendra par exemple l'effet indiqué sur la figure 12.

Nous donnons, figure 13, un exemple pratique de détermination correcte ; il s'agit d'un tube triode de puissance obtenu au moyen d'une pentode de puissance dont la grille écran et l'anode ont été reliées ensemble (*fig.* 14). On constitue ainsi une excellente triode. Pour le tube en question sous 250 V la polarisation correcte était de 11,5 V. On remarquera sur la figure 13 que la caractéristique composée est rigoureusement droite. *Ce ne serait pas le cas pour un montage symétrique en classe A.*

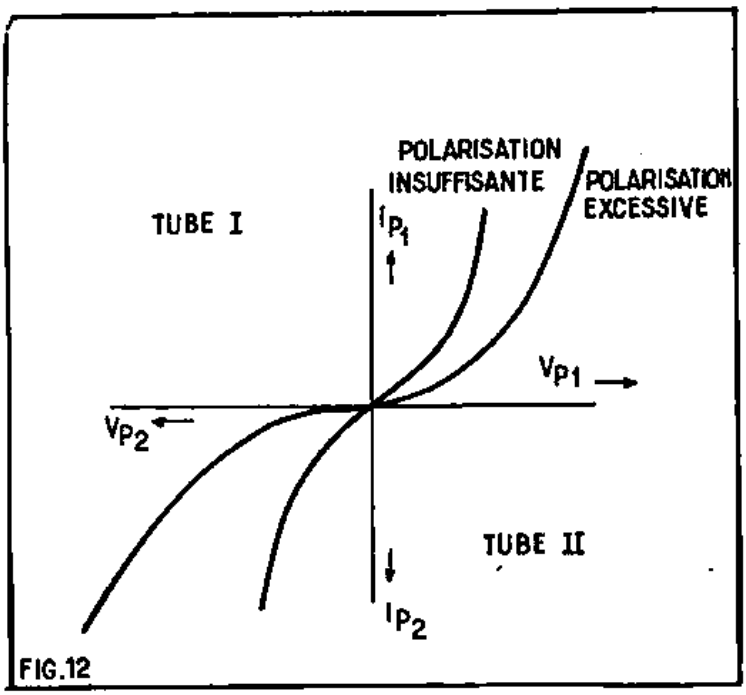


FIG. 12. — *La caractéristique n'est pas droite quand la polarisation est mal choisie.*

Cela nous permet de remarquer que ce n'est pas la recherche d'un grand rendement qui doit guider vers le choix d'un montage en classe AB1, mais la recherche d'une très bonne qualité de réception.

La polarisation.

Nos lecteurs savent que la polarisation négative des grilles peut être réalisée de deux manières différentes :

a) *Polarisation automatique* (par la cathode) ;

b) *Polarisation fixe* (par la grille).

Le principe bien connu de la polarisation automatique par la cathode est indiqué sur la figure 15 *a*. Il est applicable aux tubes à chauffage indirect. Il suffit d'insérer une résistance de valeur appropriée R_k dans le retour de cathode. Pour éviter tout effet de contre-réaction, il faut découpler cette résistance au moyen d'un condensateur C_k dont l'impédance est négligeable par rapport à R_k.

On dit que cette polarisation est *automatique* parce que toute augmentation de tension d'alimentation qui tend à entraîner une augmentation de courant de cathode se traduit *automatiquement* par une augmentation de la polarisation et — en conséquence — une protection du tube amplificateur.

Ce montage n'offre que des avantages en classe A puisque l'intensité de courant cathodique est fixe.

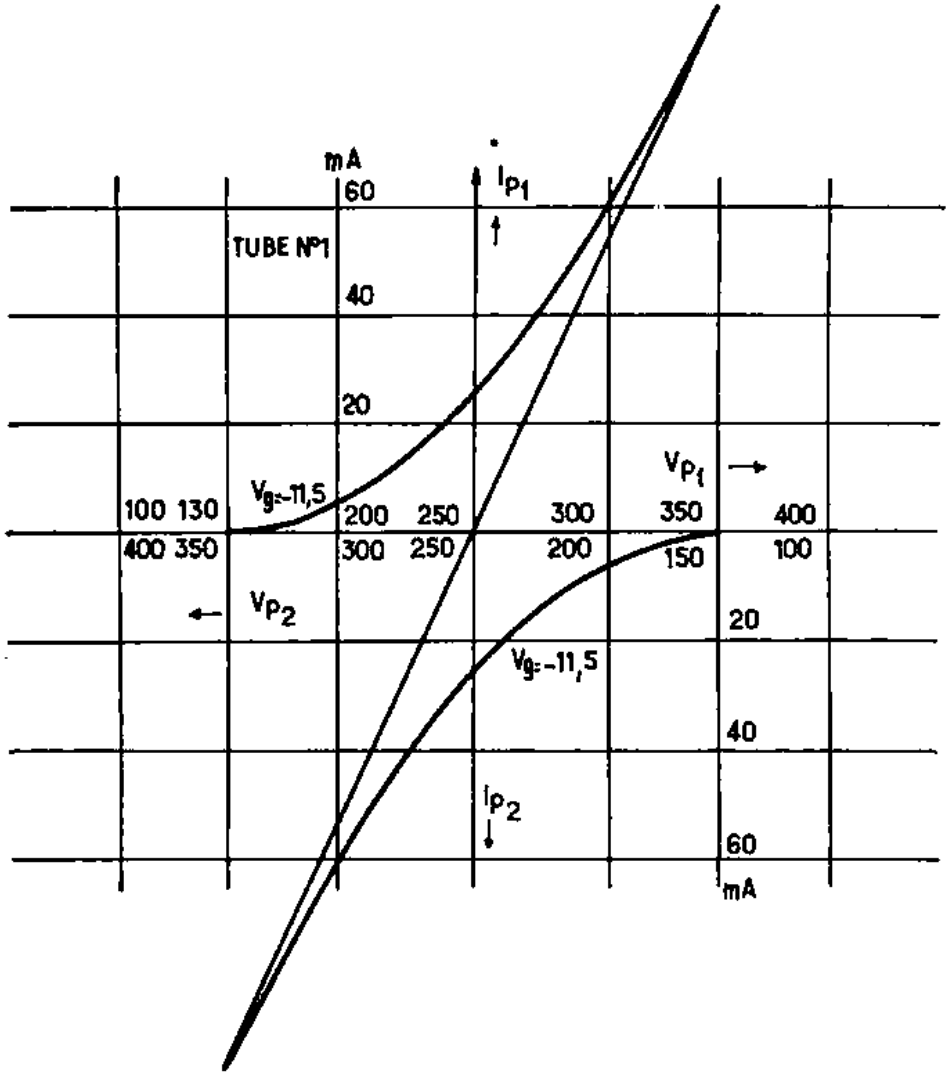


FIG.13

FIG. 13. — *Cet exemple montre bien que la caractéristique composée est parfaitement droite. Cela permet de comprendre pourquoi un étage en classe AB1 donne une fidélité de reproduction exceptionnellement bonne. qu'elle est rigoureusement droite si la valeur de polarisation est correctement choisie.*

Ce procédé ne peut absolument pas être employé en classe B ou en classe C, puisque le courant d'anode dépend de l'excitation d'entrée.

En classe AB, on peut l'employer. On remarquera toutefois que la polarisation augmente avec la puissance fournie par l'amplificateur. En effet, le courant d'anode varie en fonction de cette même puissance.

En pratique cette variation n'apporte pas des inconvénients trop importants. Dans un montage en classe AB les composantes instantanées fournies par les deux tubes ne sont pas égales puisque la caractéristique n'est pas droite. Il en résulte que la tension alternative entre les extrémités de la résistance de découplage n'est pas nulle. Ainsi, si l'on veut éviter toute contre-réaction d'intensité, il faut prévoir le découplage RK au moyen d'un condensateur CK. Mais cela pose un problème. En effet, la valeur de la résistance RK est faible : de l'ordre de 100 Ω. Pour que le découplage soit efficace, en fréquence et surtout en phase, il faut que

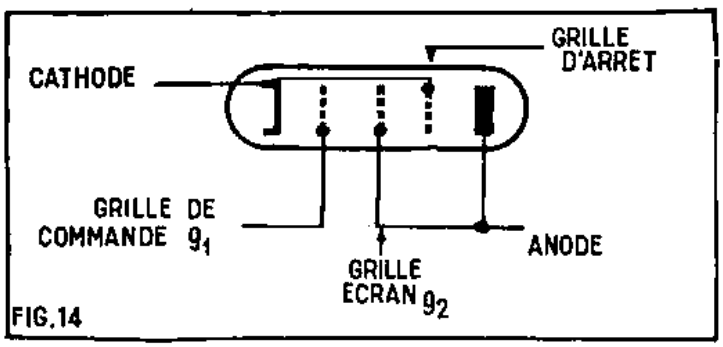


FIG.14

FIG. 14. — *On transforme un tube pentode en tube triode en reliant directement la grille écran à l'anode.*

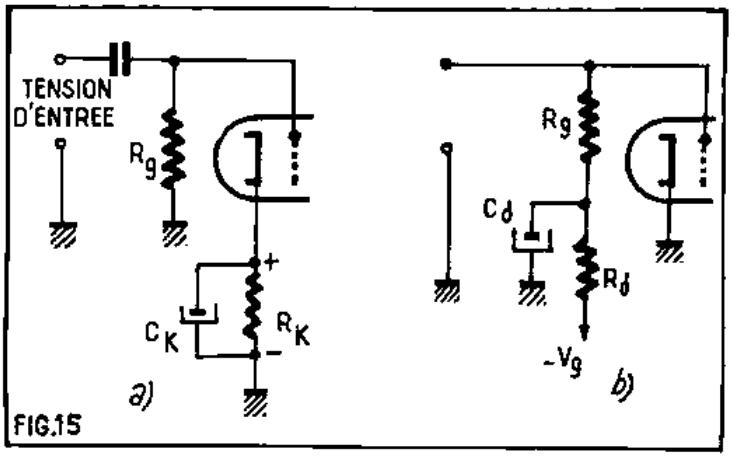


FIG. 15. — a) *Principe de la polarisation automatique ou par la cathode.*
b) *Principe de la* polarisation fixe *ou par la grille.*

l'impédance de CK soit tout à fait négligeable par rapport à la résistance RK.

On peut calculer que pour réaliser une impédance de 8 Ω à 25 Hz, il faudrait prévoir un condensateur de 800 μF environ. Il est rare qu'on ait recours à des capacités aussi élevées, sauf dans les amplificateurs à vidéo-fréquence.

Mais le problème se pose pourtant de la même manière quand on veut réaliser un amplificateur aussi parfait que possible...

Une solution meilleure... et beaucoup plus simple consiste à ne pas découpler la résistance et à supprimer tout simplement le condensateur, l'expérience montre que cela ne change pratiquement rien... La diminution de sensibilité apportée par la contre-réaction d'intensité n'apparaît pas.

Emploi de la polarisation fixe.

L'emploi de la polarisation fixe (*fig.* 15 *b*) est aussi une excellente solution. Le procédé permet d'éviter beaucoup plus facilement toute distorsion de phase, même avec un condensateur C*d* de valeur relativement faible. On peut, en effet, adopter une valeur beaucoup plus élevée pour R*d*.

On peut même éventuellement remplacer C*d* par un condensateur au papier puisque R*d* peut être de plusieurs centaines de milliers d'ohms.

Il faut toutefois noter que le système ne présente pas les mêmes garanties de sécurité que le précédent pour peu que l'alimentation présente des variations de tension. Il n'y a pas d'effet de régulation automatique et le tube amplificateur peut travailler dans des conditions de surcharge inadmissibles.

Il est donc toujours prudent de le faire travailler au-dessous des limites de dissipation prévues par le constructeur, surtout quand il s'agit de tubes à grande pente.

Une autre difficulté, c'est évidemment d'obtenir cette tension fixe de polarisation. Quand elle est fournie par l'alimentation anodique de l'amplificateur, comme nous l'indiquons sur la figure 16, on ne peut plus dire qu'il s'agit alors de *polarisation fixe.* En effet, c'est l'étage de puissance qui consomme la plus grande partie de l'intensité fournie par l'alimentation anodique... c'est-à-dire celle qui traverse R*p*. La tension entre les extrémités de R*p* dépend donc très largement de la consommation de l'étage de puissance. Ce montage présente les mêmes inconvénients et les mêmes avantages que le précédent.

On peut obtenir réellement une polarisation *fixe* avec une source entièrement séparée. On peut, par exemple, redresser la tension du secteur à l'aide d'une diode à germanium et filtrer la tension ainsi obtenue. On obtient alors une tension de polarisation qui est entièrement indépendante de toutes les variations de consommation de l'étage final.

Amplificateur en classe AB2.

Les propriétés du montage ne diffèrent pas sensiblement de celle des montages en

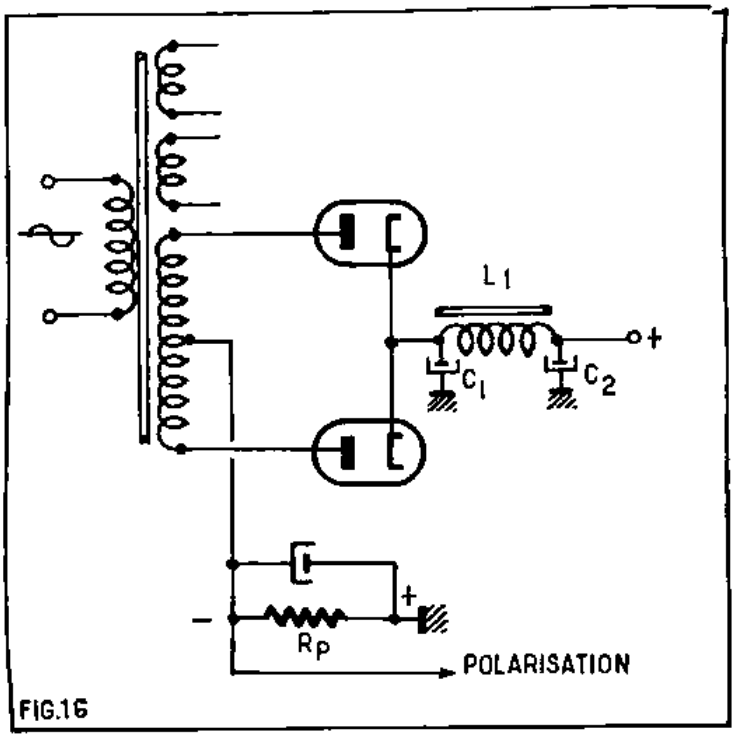


FIG. 16. — *Ce montage constitue une polarisation* semi-fixe *pour peu que la consommation de l'étage final représente la plus grande partie de la consommation totale.*

classe B qui ont été étudiés dans nos articles précédents. Nous avons d'ailleurs indiqué que pour réduire l'importance de la distorsion à faible puissance, on ne choisit pas la polarisation V_g, correspondant à la tension de coupure, mais une polarisation plus faible V'_g obtenue en prolongeant la partie droite de la caractéristique jusqu'à l'axe des tensions de grille. Le point de repos n'est plus alors B, mais B'... ce qui correspond précisément à la classe AB. Comme les tensions d'entrée ont une amplitude assez élevée pour provoquer la naissance du courant de grille, il s'agit en fait de classe AB2.

On a recours à ce mode de fonctionnement quand on veut obtenir une très grande puissance utile et les considérations relatives à la fidélité de reproduction passent alors au second plan.

On peut, à la rigueur, utiliser un système de polarisation automatique. Mais on limite aussi la puissance que peut fournir l'amplificateur. Il est bien préférable d'avoir recours à la polarisation fixe.

L'intensité moyenne anodique varie fortement au cours du fonctionnement. Si l'on veut maintenir la puissance, il est indispensable que, malgré cela, la tension anodique varie aussi peu que possible. Cela pose des problèmes difficiles. Il faut avoir recours à une source d'alimentation à faible résistance interne.

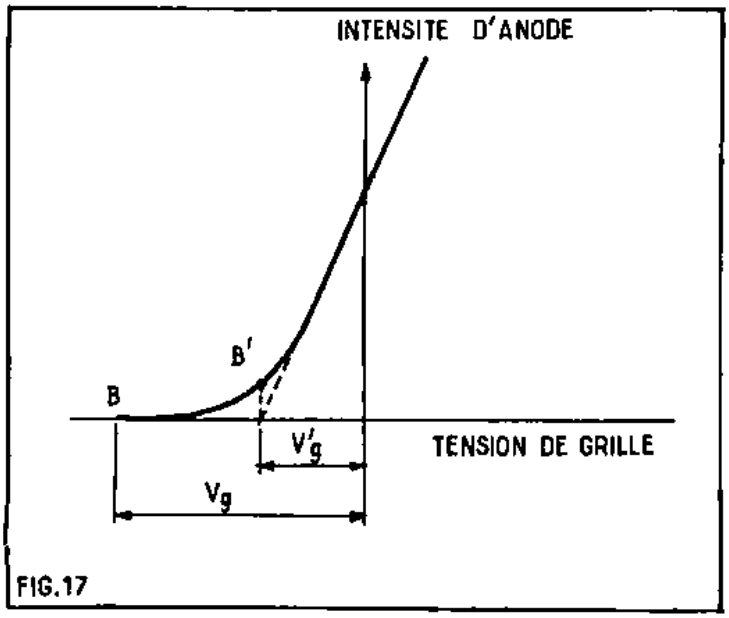


FIG. 17. — *Pour éviter la distorsion à faible niveau en classe B on n'adopte pas le point de repos B, mais le point B.*

On emploie, par exemple, des tubes redresseurs à vapeur de mercure ou des redresseurs à jonction avec filtrage par inductance d'entrée. La régulation de tension est aussi nettement améliorée.

Quand on emploie des tubes tétrodes ou pentodes, il faut que la tension d'alimentation des écrans soit invariable. On est parfois amené à prévoir une alimentation stabilisée qui fournit les tensions d'écran et les tensions de polarisation. Ce raffinement ne se justifie que dans le cas d'une installation de très grande puissance.

En classe AB2 on utilise exclusivement la liaison par transformateur entre l'étage d'attaque (ou driver) et l'étage de puissance. L'étage d'attaque est alors nécessairement un tube triode, car la résistance interne d'un tube pentode est trop élevée pour que la liaison par transformateur soit possible.

L'étage d'attaque doit pouvoir fournir sans difficulté la puissance de crête correspondant au passage du courant de grille. La résistance des enroulements de transformateur doit être très faible. Le rapport de transformation est généralement inférieur à 1. On voit ainsi qu'il s'agit surtout d'un transformateur d'adaptation. Comme tube d'attaque on emploie généralement un tube de puissance (EL84 ou 6F6) monté en triode.

On retiendra le fait essentiel que l'amplification en classe AB1 permet d'obtenir une grande fidélité de reproduction alors que l'amplification en classe AB2 permet d'obtenir une grande puissance.

Par exemple :

2 tubes 6L6 en classe A, montage symétrique sous 350 V fournissent 18 W.

En classe AB1 : 26,5 W.

En classe AB2 : 47 W,

pour des taux de distorsion de l'ordre de 5 %.

D. L. 4e trim. 1962. — 620.614. — Imprimerie de Sceaux, 5, rue Michel-Charaire, Sceaux (Seine), — 10-62.
S. P. E., 43, rue de Dunkerque, Paris-Xe.